

The seal of the University of Zaragoza is a circular emblem. It features a central shield with a crown on top, surrounded by a sunburst. The shield is divided into four quadrants with various symbols. The shield is set against a background of a compass rose. The entire emblem is enclosed in a circular border with Latin text. The top part of the border reads 'MOBILIBVS' and the bottom part reads 'SAPIENTIA'.

**GENERACIÓN DE ENTORNOS VIRTUALES
PARA EL REGISTRO Y EVALUACIÓN DEL
COMPORTAMIENTO HUMANO EN CASO
DE INCENDIO**

CARLOS DE LAMA BURGOS

**PROGRAMA DE DOCTORADO EN
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

Dra. CRISTINA GONZÁLEZ GAYA

Dr. ALBERTO SÁNCHEZ LITE

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES

Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales

GENERACIÓN DE ENTORNOS VIRTUALES
PARA EL REGISTRO Y EVALUACIÓN DEL
COMPORTAMIENTO HUMANO EN CASO DE INCENDIO

Carlos de Lama Burgos

Directora

Cristina González Gaya

Director

Alberto Sánchez Lite

A mis hijos Elena y Carlos
A mis padres Antonio y María del Carmen

“Observa que, mientras que el hombre individual es un rompecabezas insoluble, en el conjunto se convierte en una certeza matemática. Por ejemplo, nunca se puede predecir lo que hará un hombre, pero sí se puede decir con precisión lo que un número promedio puede hacer. Los individuos varían, pero los porcentajes permanecen constantes.”

Sir Arthur Conan Doyle, El signo de los cuatro, 1860.

Agradecimientos

En primer lugar, quería expresar mi profunda gratitud a mis Directores D.^a Cristina González Gaya y D. Alberto Sánchez Lite por su apoyo incondicional desde el primer instante, su dedicación y su tiempo. Mi reconocimiento a su permanente apoyo y estímulo, sus sugerencias y consejos que han sabido transmitirme para culminar esta Tesis.

A Ana Larrañaga Pastor, cuya colaboración ha sido esencial en todo el camino recorrido desde las primeras reuniones de trabajo, pasando por las exhaustas experiencias de usuario, hasta su visión siempre acertada para solventar cualquier dificultad que se pudiera presentar.

Al Colegio Oficial de Graduados e Ingenieros Técnicos Industriales de Madrid, que en todo momento ha apoyado y respaldado esta investigación, y en especial a mi tutor D. Fernando Blaya Haro a quien agradezco sus sabios consejos.

A la Asociación Profesional de Técnicos de Bomberos, a su Director-Gerente Gabriel Muñoz Simal y todos y cada uno de los Bomberos que han colaborado de manera siempre desinteresada ofreciendo su experiencia y conocimiento en el ámbito de los incendios.

A Fundación Mapfre, sin cuya financiación no hubiera sido posible esta investigación.

A Juan Rivas Morales y Sabela Reig Vila, cuya implicación en esta investigación aportando todos sus conocimientos en el ámbito de la Realidad Virtual ha sido fundamental.

A mi gran amigo y compañero en esta aventura, Carlos Manzanares Cañizares.

Y finalmente a mi gran amigo el Dr. Miguel Aguilera Merlo, “El Concejal” quien ha sido toda una inspiración para llegar hasta aquí.

Resumen

La posibilidad de analizar y comprender las decisiones que toman los ocupantes de un edificio durante incendio puede ser esencial para reducir el riesgo de que puedan sufrir algún tipo de daño y para facilitar su acceso hasta una zona de seguridad.

El estudio del comportamiento humano, es decir las decisiones que toman los ocupantes, en caso de incendio entraña graves dificultades, siendo la primera de ellas la gran cantidad de variables procedentes de diferentes ámbitos del conocimiento que deben analizarse, tanto de manera individual como en conjunto ya que se generan relaciones entre ellas que evolucionan a lo largo del tiempo. Estas variables son aquellas que caracterizan el edificio, caracterizan la propia dinámica del incendio y caracterizan el perfil físico y perfil conductual de los ocupantes. La segunda dificultad reside en la imposibilidad de disponer de datos de comportamiento fiables en tiempo real dada la naturaleza propia de los incendios, como eventos no predecibles, esporádicos y no reproducible.

La Realidad Virtual puede recrear un entorno de usuario inmersivo y realista en la que el participante experimente sensaciones muy similares a las de un incendio real y poder obtener así datos de comportamiento que tengan validez interna y externa.

Esta investigación presenta un protocolo para el diseño y generación de entornos virtuales, así como para las condiciones en las que debe realizarse la experiencia de usuario con el fin de captar y registrar datos de comportamiento humano en caso de incendio ecológicamente válidos.

Palabras Clave: Evacuación, comportamiento humano, fuego, realidad virtual, salida, emergencia

Abstract

The ability to analyze and understand the decisions made by the occupants of a building during a fire can be essential to reduce the risk of them suffering any type of damage and to facilitate their access to a safe area.

The study of human behavior in case of fire involves serious difficulties, the first of which is the large number of variables from different fields of knowledge that must be analyzed, both individually and as a whole, since relationships are generated between them that evolve over time. These variables are those that characterize the building, characterize the dynamics of the fire itself and characterize the physical and behavioral profile of the occupants. The second difficulty lies in the impossibility of having reliable behavioral data in real time given the nature of fires, such as unpredictable, sporadic and non-reproducible events.

Virtual Reality can recreate an immersive and realistic user environment in which the participant experiences sensations very similar to those of a real fire and thus be able to obtain behavioral data that have internal and external validity.

This research presents a protocol for the design and generation of virtual environments, as well as for the conditions in which the user experience must be carried out in order to capture and record human behavior data in case of fire that is ecologically valid.

Keywords: Evacuation, human behavior, fire, virtual reality, exit, emergency

Índice General

1. Introducción	1
1.1. Objetivo de la Tesis	4
1.2. Estructura de la Tesis	5
2. Antecedentes.....	7
2.1. Conceptos erróneos asumidos en los incendios	7
2.2. Normativa de Seguridad en caso de Incendio.....	19
2.2.1. Evolución Normativa de la Seguridad en caso de Incendio.....	21
2.2.2. Enfoques normativos.....	25
2.2.3. Normativa Vigente de Seguridad en caso de Incendio.....	29
2.2.4. Normativa Vigente de Planificación de la Evacuación	32
3. Planificación integral de la Seguridad en caso de Incendio	44
3.1. Entorno.....	45
3.2. Dinámica del incendio	52
3.2.1. Teoría del incendio	55
3.3. Comportamiento humano.....	68
4. Estudio del Comportamiento Humano en caso de Incendio.....	81
4.1. Antecedentes.....	81
4.2. Metodología	89
4.2.1. El tiempo.....	92
4.3. Los indicios.....	99
4.4. La comunicación.....	104
4.4.1. La comunicación. Señalización.....	116
4.5. El humo	120
4.6. Indicios de influencia en el comportamiento	126

5. Factores del perfil del ocupante	133
6. Los datos en el Comportamiento Humano en caso de Incendio	145
6.1. Técnicas actuales para la captación y Registro de datos	147
6.1.1. Clasificación de los métodos de investigación	147
6.1.2. Técnicas para la captación de datos	151
6.1.3. Simuladores informáticos	154
7. Proceso de toma de decisiones	160
7.1. Protective Action Decision Model. PADM	162
8. La Realidad Virtual	172
9. Protocolo	174
9.1. Proceso de diseño del protocolo. Premisas iniciales	176
9.2. Metodología y herramientas	178
10. Resultados	195
11. Conclusiones	209
12. Referencias	220

Lista de figuras

Figura 1: Pruebas con silla de evacuación	38
Figura 2: Interacción Entorno-Incendio-Comportamiento	45
Figura 3: Configuraciones tipo en los establecimientos industriales. Fuente: NTP 831	48
Figura 4: Curva del desarrollo de un incendio en un recinto confinado.....	57
Figura 5: Incendio en un recinto con la ventilación limitada.....	58
Figura 6: Combustión súbita generalizada (flashover)	59
Figura 7: Explosión de gases con efecto reverso (backdraft)	60
Figura 8: Onda expansiva en explosión por un proceso químico.	62
Figura 9: Comparación Curva normalizada y Curva de incendio natural	66
Figura 10: Captura de pantalla del cálculo de la curva de incendio natural según Figura 9	68
Figura 11. Causa del origen de los incendios con víctimas mortales en 2017.....	70
Figura 12. Intervenciones de bomberos en España por cada millón de habitantes.....	72
Figura 13. Víctimas mortales en España por cada millón de habitantes.	72
Figura 14: Desarrollo de la emergencia - tiempo. Punto de intervención	93
Figura 15. Tiempo estimado para la evacuación	94
Figura 16: Línea temporal del proceso de evacuación.....	96
Figura 17: Norma ISO 8201 Señal de evacuación.....	106
Figura 18. Norma DIN33404-3 Señal de emergencia unificada.....	107
Figura 19: Norma BS 5839-1 Señal de vacuación.....	107
Figura 20: Norma BS 5839-1 Señal de alerta	108
Figura 21: Norma NF S32-001 Señal de evacuación.....	108
Figura 22: Norma NEN 2575 Señal de evacuación	109
Figura 23. Atención a los mensajes	115
Figura 24: Velocidad media por participante en función del coeficiente de extinción	124

Figura 25. Velocidad de desplazamiento en función del tipo de humo.....	124
Figura 26. Velocidad de desplazamiento agachado en función de la densidad de ocupación....	125
Figura 27. Captura de pantalla del software Oasys Massmotion.....	157
Figura 28. Captura de pantalla del software Pathfinder Thunderhead.....	158
Figura 29. Captura de pantalla del software Legion.	158
Figura 30: Proceso de toma de decisiones	160
Figura 31: Proceso iterativo de toma de decisiones.....	166
Figura 32. Proceso de toma de decisiones en situación de amenaza.	170
Figura 33. Proceso de toma de decisiones en un incendio.....	171
Figura 34. Dispositivo HTC de Realidad Virtual.	179
Figura 35. Plataforma 3drudder.	179
Figura 36. Captura de pantalla, entrada del edificio.	183
Figura 37. Captura de pantalla, primera planta.....	184
Figura 38. Captura de pantalla, salida de emergencia.	184
Figura 39. Captura de pantalla, vigilante.....	185
Figura 40. Capturas de pantalla del Equipo de Alarma y Evacuación.....	186
Figura 41. Capturas de pantalla del incendio.....	187
Figura 42. Simulación de la visualización del incendio.	187
Figura 43. Pruebas y validación de bomberos.	188
Figura 44 Representación de la teoría del flujo.	190
Figura 45. Experiencia de usuario.	192
Figura 46. Esquema para la aplicación del protocolo.....	194
Figura 47: Ejemplo de trayectoria 1.....	202
Figura 48: Ejemplo de trayectoria 2.....	203
Figura 49: Ejemplo de trayectoria 3.....	204

Figura 50: Ejemplo de trayectoria 4..... 205

Figura 51: Ejemplo de trayectoria 5..... 206

Figura 52: Ejemplo de trayectoria 6..... 207

Lista de tablas

Tabla 1: Código de colores en rociadores según UNE-EN 12259-1:2002	11
Tabla 2. Tiempos de evacuación con movimiento de flujo de bomberos en sentido opuesto	18
Tabla 3: Línea temporal de sucesos y normativa de seguridad en los Estados Unidos	22
Tabla 4: Antecedentes de la Normativa de Seguridad en caso de Incendio. Ciudad de Madrid ..	24
Tabla 5: Antecedentes de la Normativa de Seguridad en caso de Incendio	25
Tabla 6: Recorrido de evacuación según número de salidas en Establecimientos Industriales...	36
Tabla 7: Actividades sujetas a Plan de Autoprotección. Norma Básica de Autoprotección	41
Tabla 8: Clasificación de los usos según DB SI	46
Tabla 9: Temperaturas y consecuencias que produce en el cuerpo humano	54
Tabla 10: Diferencias entre flashover y backdraft.....	61
Tabla 11: Temperaturas de la curva normalizada según Figura 9	67
Tabla 12 Factores que contribuyen al incremento de víctimas.....	80
Tabla 13: Porcentaje de supervivientes en el WTC1 que sintieron el impacto del avión.....	102
Tabla 14: Indicios percibidos por supervivientes en el WTC1 posteriores al impacto	103
Tabla 15: Indicios percibidos por supervivientes en el WTC1 por sentidos	104
Tabla 16: Patrones de sonido de alarma utilizados en algunos países europeos	106
Tabla 17. Recomendación en Suecia de emisión de alarma y comunicación.....	114
Tabla 18. Información contenida en los mensajes de evacuación efectivos.....	116
Tabla 19. Efectos del humo en la velocidad	123
Tabla 20: Factores que pueden influir en la toma de decisiones en caso de incendio	132
Tabla 21: Factores de personalidad y conocimientos en caso de incendio.....	134
Tabla 22: Valores de referencia en la evacuación de personas con limitaciones	159
Tabla 23: Factores que influyen en la toma de decisiones.....	165
Tabla 24. Estudio del comportamiento humano en incendios: Comparativa de metodologías ..	174

	xiii
Tabla 25: Especificaciones de los dispositivos.....	178
Tabla 26. Variables de comportamiento identificadas en el protocolo.....	182
Tabla 27: Porcentaje de participación por sexo	195
Tabla 28: Porcentaje de edades de usuarios.....	195
Tabla 29: Porcentaje de participantes según nivel de estudios	196
Tabla 30: Tiempo de reconocimiento. Porcentaje de participantes demora-instantáneo.....	196
Tabla 31: Promedio de participantes con tiempo de demora en Tiempo de reconocimiento	197
Tabla 32: Demora en Tiempo de reconocimiento por edad y sexo	197
Figura 33: Muestra de tiempo de respuesta por participante en segundos	198
Tabla 34: Tiempo de respuesta	198
Tabla 35: Visualización de señales de evacuación	199
Tabla 36: Porcentaje de participantes que se confinan en un despacho	199
Tabla 37: Porcentaje de participantes que opta por escalera inundada de humo.....	200
Tabla 38: Porcentaje de participantes que intentan evacuar en ascensor.....	200
Tabla 39: Porcentaje de incremento de la frecuencia cardíaca durante la experiencia.....	201
Tabla 40: Porcentaje de incremento del nivel de ansiedad.....	201
Tabla 41: Porcentaje de éxito en la evacuación	208

1. Introducción

El diseño de los edificios se centra en la funcionalidad de los mismos y en la seguridad de los ocupantes. En el proceso de edificación, se dedican recursos a los espacios, a la iluminación, a la insonorización, a la climatización o a la accesibilidad con la finalidad de que el edificio disponga de las condiciones adecuadas para su uso.

En este proceso, los técnicos deben igualmente dedicar recursos materiales y humanos a la seguridad de los ocupantes con el objetivo de reducir a límites aceptables el riesgo de que éstos puedan sufrir daños por distintos tipos de contingencias incluyendo el incendio de origen accidental. En el caso de la Seguridad en caso de Incendio, los recursos dedicados a la prevención y extinción permiten a los usuarios desarrollar con confianza las actividades previstas en sus lugares de residencia, trabajo u ocio.

Pero a pesar de los avances que se han podido hacer en materia de seguridad en caso de incendio, se siguen produciendo desastres en edificios con unas consecuencias fatales [1] debido, en muchos casos, a que los ocupantes del edificio no tuvieron en cuenta los dispositivos de alarma y control, o no tuvieron en cuenta los procedimientos previstos para la evacuación hasta una zona de seguridad.

Asimismo, otra de las causas por las que se sigue habiendo víctimas en los incendios a pesar de los avances tecnológicos y las medidas de protección dispuestas, es la falta de conocimiento por parte de los técnicos proyectistas para hacer una previsión acertada del comportamiento de los usuarios en condiciones extremas.

Una planificación eficiente de los sistemas de seguridad en caso de incendio y de los procedimientos de evacuación requiere el conocimiento de los modelos de comportamiento humano [2] que trasciende la aplicación de los códigos de construcción basados en prestaciones o las normas para la elaboración de planes de emergencia.

Ahondando en este sentido, se puede afirmar que existe una relación entre la caracterización del perfil de un usuario y la previsión de su comportamiento durante un incendio [3]. Esta caracterización establecida por la edad, el sexo, la capacitación física, la personalidad, el conocimiento del entorno o la experiencia previa en este tipo de eventos entre otros se demuestra imprescindible si se pretende determinar un modelo de comportamiento.

Este es el motivo por el que se hace necesario desarrollar sistemas de captación y registro de datos que sean capaces de analizar la toma de decisiones, es decir que puedan relacionar la causa y el efecto y por tanto que tengan validez interna.

Ahora bien, dos son las causas [4] principales que motivan la dificultad para poder realizar esta captación y registro del comportamiento. La primera de ellas es la imposibilidad de poder obtener datos durante el desarrollo de un incendio en tiempo real, debido a la propia naturaleza de los incendios, que podemos definir cómo eventos difíciles de predecir, esporádicos e imposibles de reproducir.

La segunda causa que dificulta la captación y registro de datos es la gran cantidad de variables cuantitativas y cualitativas que se interrelacionan entre sí y que a su vez evolucionan lo largo del proceso del incendio, tales como las características del edificio, las propias de la dinámica del incendio y las del perfil del usuario.

Con el objetivo de desarrollar una teoría general del comportamiento humano en caso de incendio, diversos investigadores [5], [6], [7] han tratado de establecer avances a través de la coordinación de distintos campos de conocimiento implicados tales como la ingeniería de protección contra incendios, la simulación computacional o el comportamiento en un ámbito multidisciplinar. Sin embargo, el problema de base es la imposibilidad de analizar datos obtenidos durante el incendio en tiempo real.

Esta Tesis presenta una metodología que, mediante un dispositivo de Realidad Virtual, permite la captación y registro de datos de comportamiento humano en caso de incendio ecológicamente válidos [8].

La Realidad Virtual es una tecnología que permite la recreación realista de un entorno dentro del cual el usuario tiene una experiencia inmersiva en el que puede interactuar, pero además es posible introducir personajes virtuales o eventos como un incendio que provocan una respuesta por parte de dicho usuario.

El propio dispositivo permite la captación de estas respuestas de comportamiento que puede ser evolutivo, registrando desplazamientos, velocidades, movimientos de cabeza, visualización de objetos y en el caso de incluir la programación de periféricos o dispositivos complementarios pueden registrarse otros parámetros que pueden ser de interés como la frecuencia cardíaca o la presión sanguínea.

Esta Tesis presenta además un protocolo que se establece en tres fases. La primera fase es la *Configuración del sistema* en el que se determinan las variables de comportamiento que se desean captar, la actividad que se desarrolla en el entorno virtual y las características del escenario así como el objetivo de usuario. La segunda fase establece la *Configuración de*

usuario, donde se detalla el procedimiento de la experiencia y el registro del perfil de usuario. La tercera fase es la *Simulación virtual*, donde se establece cómo realizar la experiencia de usuario y el análisis de las variables de comportamiento.

El protocolo permite al investigador eliminar las posibles variables de confusión que puedan distorsionar y afectar a la validez interna de los datos y a su vez, proporciona la flexibilidad y el realismo de una metodología que permite al investigador realizar estudios que pueden ser generalizados y por tanto dar validez externa a los resultados obtenidos.

1.1. Objetivo de la Tesis

La investigación del comportamiento humano en caso de incendio es un campo esencial para conseguir diagnósticos precisos del desempeño de los sistemas de protección contra incendios, así como de los protocolos de evacuación de los edificios. Actualmente los métodos para la obtención de datos de comportamiento no son fiables dada la propia naturaleza de los incendios y no tienen validez ecológica.

El objetivo principal de la tesis es el desarrollo de un protocolo para posibilitar la captación y registro de datos de comportamiento humano en caso de incendio, que tengan validez ecológica mediante el uso de entornos virtuales generados por dispositivos de Realidad Virtual. El protocolo permite el registro de datos en todas las fases de la evacuación, desde el momento en el que se detecta el incendio hasta que el usuario alcanza una zona de seguridad. Por tanto, el protocolo permite registrar datos de comportamiento en los intervalos antes y después de iniciarse el desplazamiento.

El protocolo se divide en dos fases. Una primera fase, donde se establece el criterio general para el diseño del entorno virtual, en el que se incluye el edificio y la dinámica del incendio, y una segunda fase, en la que se establecen las condiciones de la experiencia de usuario para la captación y registro de los datos.

A efectos de esta investigación, se denomina *experiencia* a todo el proceso del registro de datos de perfil y comportamiento. Se denomina *misión*, al intervalo de la experiencia en la que el usuario está dentro del entorno virtual.

La metodología utilizada es la propia del método científico, se inicia planteando un problema, se propone un modelo con el que se trabaja en determinados casos, se analizan los resultados y se proponen unas conclusiones.

Se identifican los factores que pueden tener una influencia significativa en el proceso de la toma de decisiones durante la evacuación de un edificio a partir de un análisis riguroso tanto del problema como del estudio de la documentación que constituyen el estado del arte. Identificados los factores, se propone un protocolo que pueda dar respuesta al problema planteado y se analiza si los resultados obtenidos satisfacen el objetivo de la investigación.

1.2. Estructura de la Tesis

Para alcanzar el objetivo de esta investigación se han ido desarrollando las diferentes etapas según el siguiente esquema.

En primer lugar, se establecen las bases del comportamiento humano y para ello, se parte de la premisa en la que se establecen los errores conceptuales asumidos por la inmensa

mayoría de la población. Al ser conceptos asumidos, tienen una influencia directa en la planificación de los procedimientos de los técnicos competentes.

En este punto, se determina el marco normativo de obligado cumplimiento y la normativa de reconocido prestigio. Para ello, se indaga acerca del origen histórico tanto de los códigos de construcción como de las normas o recomendaciones en materia de evacuación de personas. En este sentido se demostrará cómo la normativa se ha visto obligada a adaptarse por demanda de la sociedad tras las conclusiones de los informes redactados por expertos en los casos más significativos de incendio con víctimas mortales. Así, se establecerá una conexión entre evento y adaptación normativa. Dentro del mismo capítulo se establecerá una cronología de algunas de las normas que representan la evolución de la investigación en materia de comportamiento humano en caso de incendio durante el siglo XX.

El análisis de la actual de la normativa vigente no solo pasa por relacionar la normativa que afecta a los diseños de edificios, instalaciones y procedimientos de evacuación en los diferentes campos que afectan al comportamiento humano, sino que se analizará la estructura normativa prescriptiva y prestacional donde se analizará el concepto de seguridad equivalente.

El siguiente capítulo hace referencia a la planificación integral de la seguridad contra incendios que es afectada por el entorno, la dinámica del incendio y el comportamiento humano.

El comportamiento se analiza en los siguientes capítulos tanto en los factores que le afectan como en los métodos de análisis y captación de datos.

Dado que el objetivo de esta tesis es el uso de dispositivos de realidad virtual, se dedicará un capítulo a conocer los métodos de investigación con estas herramientas, así como establecer la posibilidad de su uso para la captación y registro del comportamiento.

Una vez se dispone de toda esta información se establece cómo debe diseñarse un protocolo flexible que posibilite la captación de datos de comportamiento según las variables que se deseen considerar y se relacionan los resultados obtenidos mediante el uso del protocolo, así como las conclusiones y posibles puestas de mejora del sistema.

2. Antecedentes

2.1. Conceptos erróneos asumidos en los incendios

La planificación de la seguridad en caso de incendio en un edificio engloba distintos tipos de conocimientos. En esta planificación se deben tener en cuenta cómo interactúan entre sí tres áreas, según expone la investigadora Rosaria Ono [4], el diseño del *edificio* incluyendo sus instalaciones, la *dinámica del incendio* y el *comportamiento* de los usuarios.

Dada la complejidad para obtener datos válidos del comportamiento de las personas durante el incendio en un edificio es posible que se adopten o asuman conceptos erróneos acerca de lo que ocurre durante el incendio.

A continuación, se exponen algunos de los ejemplos más significativos de estos conceptos erróneos asumidos en caso de incendio recogidos por el investigador Brian Meacham [9].

- **Los códigos de edificación garantizan la seguridad durante la evacuación**

El cumplimiento de las normas propuestas en los códigos de construcción no garantiza la seguridad de los ocupantes del edificio. Tal como se expondrá posteriormente, el Documento Básico de Seguridad en caso de Incendio o DB SI del Código Técnico de la Edificación¹ tiene como objetivo reducir a límites aceptables el riesgo de que los usuarios de un edificio sufran daños derivados de un incendio de origen accidental, como consecuencia de las características de su proyecto, construcción, uso y mantenimiento.

En sus Criterios Generales, el mismo DB SI indica que en edificios que deban tener un plan de emergencia conforme a la reglamentación vigente, éste preverá procedimientos para la evacuación de las personas con discapacidad en situaciones de emergencia, lo que supone que debe complementarse la seguridad mediante un plan de emergencia o un plan de autoprotección.

Otros medios que garantizan la reducción de riesgos, pero no los eliminan son los procesos de verificación y control que proporcionan los laboratorios, los organismos de control y la administración que tienen su base legislativa en el Real Decreto 2200/1995².

¹ Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación.

² Real Decreto 2200/1995, de 28 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de la Infraestructura para la Calidad y la Seguridad Industrial. Última actualización publicada el 20/06/2020.

- **Los elementos de construcción cumplen con los tiempos de resistencia al fuego que indica su denominación.**

Los materiales e instalación de paredes, techos, puertas y otros elementos deben cumplir con unas condiciones específicas de resistencia al fuego según el Real Decreto 842/2013³.

Estas condiciones, según se indica en el Anexo III del citado Real Decreto, se corresponden con el contenido de la Decisión 2000/367/CE de la Comisión, de 3 de mayo de 2000, por la que se aplica la Directiva 89/106/CEE del Consejo en lo que respecta a la clasificación de las propiedades de resistencia al fuego de los productos de construcción, las obras de construcción y los elementos de estos, modificada por la Decisión 2003/629/CE y por la Decisión 2011/232/UE.

Para la clasificación de los materiales en función de su resistencia al fuego se utilizan distintas definiciones, siendo las más utilizadas en la normativa de construcción las siguientes:

- **R** o Capacidad Portante define el tiempo en el que el elemento mantiene su resistencia mecánica.
- **E** o Integridad define el tiempo en el que el elemento impide el paso de las llamas y gases calientes.
- **I** o Aislamiento define el tiempo en el que el elemento aísla térmicamente en la cara no expuesta al fuego.

³ Anexo III Clasificación en función de las características de resistencia al fuego de los elementos y productos de construcción. Real Decreto 842/2013, de 31 de octubre, por el que se aprueba la clasificación de los productos de construcción y de los elementos constructivos en función de sus propiedades de reacción y de resistencia frente al fuego.

De esta manera y a modo de ejemplos, la denominación R60 mantiene la resistencia mecánica del elemento 60 minutos, EI90 mantiene la integridad y aislamiento del elemento 90 minutos y REI120 mantiene la resistencia mecánica, la integridad y el aislamiento del elemento 120 minutos.

Los resultados de estos datos se obtienen mediante ensayo en laboratorio según las condiciones de la norma UNE-EN 1363-1:2015⁴. En este tipo ensayo de laboratorio se utiliza un horno con unas condiciones de aumento de temperatura según una curva normalizada que se expondrá en capítulos posteriores.

La denominación de los elementos viene dada por las condiciones de laboratorio, pero no pueden tenerse en cuenta las condiciones in situ de instalación del elemento, ni las condiciones reales del incendio, por lo que el tiempo indicado en dicha denominación podría variar.

- **Los rociadores en todas las instalaciones actúan todos al mismo tiempo**

Los rociadores en sistemas de tubería húmeda disponen de un dispositivo de apertura en el que un bulbo o ampolla se rompe por temperatura y deja paso al agua. En este sistema, los rociadores automáticos están conectados a un sistema de tuberías permanentemente presurizadas y alimentadas por un sistema de abastecimiento de agua. Los componentes y

⁴ Ensayos de resistencia al fuego. Parte 1: Requisitos generales.

ensayos para los rociadores vienen definidos en la norma UNE-EN 12259-1:2002⁵ y sus posteriores modificaciones.

Los rociadores de ampolla y los de fusible sin recubrir son codificados mediante colores de acuerdo con su temperatura nominal de actuación según se expone en la Tabla 1.

Tabla 1: Código de colores en rociadores según UNE-EN 12259-1:2002

Rociadores de ampolla		Rociadores de fusible	
Temperatura de actuación en °C	Código de color en líquido	Temperatura de actuación en °C	Código de color en brazo
57	Naranja	57 a 77	Sin color
68	Rojo	80 a 107	Blanco
79	Amarillo	121 a 149	Azul
93 ó 100	Verde	163 a 191	Rojo
121 ó 141	Azul	204 a 246	Verde
163 ó 182	Malva	260 a 302	Naranja
De 204 a 343	Negro	320 a 343	Negro

Por tanto, los rociadores en sistema de tubería húmeda actúan de manera individual y su cálculo hidráulico viene definido por esta condición en la norma UNE-EN 12845:2016⁶.

⁵ Protección contra incendios. Sistemas fijos de lucha contra incendios. Componentes para sistemas de rociadores y agua pulverizada. Parte 1: Rociadores automáticos

⁶ Sistemas fijos de lucha contra incendios. Sistemas de rociadores automáticos. Diseño, instalación y mantenimiento.

A diferencia del sistema de tubería húmeda, el sistema de tubería seca se emplea en instalaciones donde hay riesgo de formación de hielo o las temperaturas superen los 95°C.

- **Los ascensores nunca deberían utilizarse en caso de incendio**

La normativa actual en España dispone ascensores de emergencia dependiendo de la configuración del edificio⁷. Para la actuación de los ascensores de emergencia, se dispondrá un pulsador junto a los mandos del ascensor en la planta de acceso al edificio, bajo una tapa de vidrio, con la inscripción "USO EXCLUSIVO BOMBEROS".

El ascensor de emergencia debe tener como mínimo una capacidad de carga de 630 kg, unas dimensiones de cabina de 1,10 m x 1,40 m, una anchura de paso de 1,00 m y una velocidad tal que permita realizar todo su recorrido en menos de 60 s. En uso hospitalario, las dimensiones mínimas de la planta de la cabina serán 1,20 m x 2,10 m.

En el caso de los ascensores convencionales, no debe utilizarse el ascensor en caso de incendio, si bien y debido a que el Código Técnico de la Edificación es una norma basada en prestaciones, no debe descartarse la instalación de ascensores que dispongan un aislamiento frente al incendio.

Hay distintas investigaciones que tratan de avalar la necesidad de diseñar e instalar ascensores que puedan utilizarse en caso de incendio para todo tipo de usuario, pero en especial para los colectivos más vulnerables. El informe NIST Technical Note 1825 [10] tiene como objetivo proporcionar una visión general del uso de los ascensores para la evacuación en

⁷ Documento Básico de Seguridad en caso de Incendio. Código Técnico de la Edificación.

edificios en altura para personas con discapacidad o movilidad reducida, exponiendo los retos técnicos que deben solventarse, además de ofrecer un estado del arte en el ámbito de la evacuación mediante ascensores y poniendo de relieve los aspectos aun no solventados.

Esta cuestión ya fue abordada por Klote [11] que enumeró las características que debe tener un ascensor para que pueda considerarse seguro.

- Protección contra calor y humo para los usuarios
 - Energía de reserva independiente del suministro habitual
 - Protección contra el agua en caso de estar en el radio de acción de bocas de incendio o rociadores.
 - Protección de los componentes contra el sobrecalentamiento
 - Comunicación de emergencia
 - Control de los desplazamientos de la cabina
-
- **El pánico es un comportamiento frecuente y generalizado durante un incendio**

Tal como expone Proulx [3] el pánico o el miedo extremo e incapacitante es un comportamiento excepcional y puntual en el tiempo que en algunas ocasiones puede confundirse con otras conductas. Otras publicaciones en este sentido como las de Sime [12], Keating [13] o Quarantelli [14] consideran como un mito el comportamiento de pánico generalizado en los incendios.

Según Proulx, la palabra pánico se utiliza como sinónimo ansiedad, preocupación o miedo, que son comportamientos típicos en situación de emergencia, pero no tiene por qué llevar a una toma de decisiones irracionales. En caso de detectarse un comportamiento ilógico

por parte de una persona durante el incendio, es posible que analizado posteriormente, se pueda encontrar una lógica dadas las circunstancias e información que en ese instante está recibiendo esta persona.

El comportamiento de pánico, sus causas, síntomas y consecuencias se desarrollará de manera exhaustiva posteriormente.

- **La evacuación se inicia inmediatamente tras la activación de la alarma.**

Existen numerosos estudios [15], [16], [17], [18], en los que se desprende que el sonido de una alarma no es suficiente para que los usuarios comiencen el desplazamiento hasta una zona de seguridad. Distintos tipos de comportamiento pueden darse tras el sonido de una alarma como investigar qué está sucediendo, avisar a los demás, dejarse llevar por las reacciones de otras personas e incluso, no tomar en consideración la alarma al pensar que es un simulacro o simplemente un error. Posteriormente se analizará con más detalle el comportamiento con las señales de alarma.

- **Las personas que evacuan utilizan la salida de emergencia más cercana.**

En muchos casos, la documentación que se propone en los proyectos de edificación se limita a calcular la densidad de ocupación y obtenido este dato por zonas o sectores de incendio, se calculan el número de salidas y los recorridos de evacuación necesaria, pero sin tener en cuenta el comportamiento de las personas.

El recorrido con menos distancia o la puerta de salida más cercana [19] no tienen por qué ser la primera opción del usuario, dependiendo de otros factores como la familiaridad del edificio, las rutas conocidas o la incorrecta ubicación y visualización de las salidas. Este análisis además debería incluir la necesaria hipótesis de bloqueo, lo que dificulta el diseño de los planes de evacuación. Así lo propone José Ignacio Leite [20] con su método de cálculo para la asignación de ocupantes a los elementos de evacuación de un edificio bajo la hipótesis de bloqueo.

Por otro lado, como plantea Nilsson [21], [166], la ubicación de las salidas de emergencia en referencia a la dirección del recorrido de evacuación, el color de la puerta y su contraste con el paramento en el que está instalada o la señalización de emergencia del edificio pueden ser condicionantes decisivos a la hora de seleccionar una puerta u otra. En otros casos, las puertas quedan ocultas detrás de elementos decorativos o son de difícil acceso.

Existen además otros factores que influyen en el comportamiento como la discapacidad [22] o la movilidad reducida en recorridos de evacuación no accesible o la influencia social, como es el caso de un usuario que interviene en la decisión de un grupo.

- **Durante la evacuación, las personas no se ayudan entre sí.**

Según investigadores como Tierney [23], [24] o Mileti [25] existen evidencias de comportamiento social, de compromiso y de ayuda con otros usuarios mientras están evacuando y de colaboración desinteresada durante los incendios.

La idea de que las personas involucradas en un incendio tienen un comportamiento individualista y no están interesados en ayudar a otros no se corresponde con la información de la que se dispone. Tampoco hay evidencias de comportamiento competitivo o imprudente durante los incendios. Como expone Quarantelli [26], en su análisis de dos incendios concretos con víctimas mortales con una gran cantidad de público donde se produjeron asfixia por aplastamiento, la mayoría de las personas involucradas no tuvieron un comportamiento irracional y se mantuvo un cierto orden social. En el estudio indica que, aunque hubo evidentemente emociones intensas y poco frecuentes causadas por condiciones extremas de aplastamiento que amenazaban la vida de los participantes, también hubo evidencia de respuestas racionales, apoyando la opción de que el comportamiento social supera en gran medida el antisocial aun en condiciones extremas. Un comportamiento similar se evidenció tras las investigaciones del NIST⁸ [27] sobre el desastre en el World Trade Center del 11 de septiembre de 2001, documentándose evidencias de ayuda y colaboración.

- **Durante la evacuación no se utilizan los recorridos inundados de humo.**

La inhalación de humo es la primera causa de muerte en un incendio [1]. Las personas que deciden evacuar a través de recorridos inundados de humo están expuestas en primer lugar, a una pérdida total o parcial de la visibilidad por la absorción de la luz de los materiales en suspensión, a distintos componentes tóxicos productos de la combustión que pueden ocasionar una incapacitación, y en último caso, la muerte. La inhalación de gases calientes puede causar también la muerte por ahogo debido a la inflamación de la epiglotis. Así mismo,

⁸ National Institute of Standards and Technology

la inhalación de material como hollines y aerosoles pueden causar el bloqueo de las vías respiratorias y causando asfixia, edema químico o lesiones térmicas que conducen a un edema. El humo también puede causar hipoxia por disminución de la concentración del oxígeno respirado.

Los espacios inundados con humo en algunos casos deben considerarse como zonas bloqueadas que exigen del usuario opciones de evacuación alternativas, pero en casos reales se ha demostrado [28], [29] que los usuarios prefieren atravesar estas zonas normalmente por no tener experiencia previa, ya que las consideran zonas de riesgo nulo, o riesgo asumible.

- **Los bomberos dificultan el tránsito por las escaleras.**

La imagen de un bombero con su equipo subiendo por unas escaleras puede dar lugar a pensar que dificulta e incluso impide la evacuación de las personas que descienden. La información que proporcionan los cuerpos de bomberos es que los encuentros entre los bomberos que ascienden y las personas que descienden son muy breves y no representan ningún retraso significativo en el proceso de evacuación. Este hecho puede verse diariamente en el flujo de pasajeros en el transporte del metro. En este medio de transporte, los viajeros tratan de entrar y salir simultáneamente. Si la escalera es estrecha y el flujo en un único sentido, se ocupa completamente el ancho de escalera.

Cuando alguna persona se dirige en contra del flujo principal, la masa principal de viajeros que ocupan el ancho de escalera se mueve creando un espacio para esta persona que avanza en sentido opuesto. Una vez ha pasado esta persona, la masa de viajeros vuelve a

ocupar el total de la escalera y rara vez el movimiento en ambos sentidos se detiene completamente. En caso de interrupción, esta dura tan solo unos segundos.

En la Tabla 2 se representa un experimento [30] realizado en un edificio de 11 alturas, donde hay 100 ocupantes por planta y dos escaleras. Se simuló el ascenso de dos grupos de 4 bomberos cada 2 minutos. Los bomberos comenzaban su ascenso 30 segundos después del inicio de la evacuación.

Se repasaron tanto un simulacro de evacuación por fases, con salida de las plantas 7 a la 11, como un simulacro de evacuación de un edificio completo. Los tiempos aproximados de movimiento de los ocupantes calculados se resumen en la Tabla 2. El contraflujo en este ejemplo creó menos de un 12% de cambio en los tiempos de evacuación totales.

Tabla 2. Tiempos de evacuación con movimiento de flujo de bomberos en sentido opuesto

	Sin flujo en contra	Con flujo en contra	Incremento
Evacuación por fases	330 segundos	360 segundos	9%
Evacuación total	540 segundos	600 segundos	11%

- **Los edificios en altura son más inseguros en caso de incendio.**

Los edificios en altura o rascacielos disponen de los medios adecuados de resistencia y lucha contra los incendios. En algunos casos las medidas son de una exigencia tal, que los hacen más seguros que otros edificios con menor altura.

En un informe de Hall Jr. [31] publicado por la NFPA⁹, se expone que de los sucesos que se registraron en edificios de siete alturas o más, estos representan sólo el 2% de todos los incendios en edificios y el 1% de las víctimas mortales. Sólo un pequeño porcentaje de los incendios de edificios en altura se propagó más allá de su origen. Este informe indica además que los incendios en edificios en altura a nivel mundial entre los años 1995 y 2004 recogen un total de 75 incendios con 294 víctimas mortales entre ocupantes y bomberos.

La explicación a estos datos, según el investigador Brian Meacham [9] es que los edificios en altura tienen una mayor exigencia normativa, por lo que disponen de todos los medios y tecnología adecuados para evitar que el fuego se propague.

2.2. Normativa de Seguridad en caso de Incendio.

Las medidas de seguridad en caso de incendio en los edificios tales como el número de salidas o recorrido de evacuación están implícitas desde las primeras construcciones.

José Ramón Alonso Pereira [32] expone que las primeras obras realizadas por el hombre, el menhir, la cueva y la cabaña fueron la base y aportaron el conocimiento y la experiencia para posteriormente realizar edificaciones de mayor complejidad. La evolución primigenia de la edificación vino suscitada por la necesidad de crear asentamientos permanentes y estos evolucionar hacia las primeras civilizaciones. Surgen también los recintos amurallados como elementos de defensa tanto en ciudades como en edificios.

⁹ National Fire Protection Association

John Fruin [33] menciona al Talmud, libro que recoge la tradición oral de los códigos civil y religioso del judaísmo, como una de las primeras referencias escritas acerca del problema del dimensionamiento de los accesos y salidas de los edificios.

El problema del dimensionamiento de los accesos a los edificios también puede apreciarse en las grandes construcciones de los sumerios y egipcios cuando comenzaron a dedicar sus esfuerzos a la construcción de templos como espacios públicos de reunión.

Los procedimientos para evacuar un lugar también se describieron según expone el investigador Ronald W. Perry [34], por parte del historiador griego Herodoto quien detalló las evacuaciones sistemáticas egipcias para escapar de las inundaciones estacionales del río Nilo en el siglo IV a.C.

Marco Vitrubio Polión [35], ingeniero y arquitecto romano es autor del tratado más antiguo sobre arquitectura que se conoce, año 15 a.C y el único que se conserva de la Antigüedad clásica. Según este tratado, las cualidades de los edificios debían ser la firmeza, la utilidad y la belleza. Además, enumera qué ámbitos debe tener en cuenta el diseño y construcción de los edificios, *ordinatio*, o tamaño adecuado, proporción y correcta distribución de las diversas partes que componen el edificio, *dispositio*, o conjunto de planos e instrucciones que es lo que hoy se entiende como proyecto de ejecución, *eurythmia*, o belleza en proporciones del edificio, *symmetria* o tamaño de las partes en proporción con el todo, *decor* u *ornamento* y *distributio*, que corresponde la parte económica del proyecto.

Vitruvio define el intercolumnio como las modalidades de distancia entre la parte exterior de dos fustes de columnas expresada en diámetros. Dependiendo de la altura de la columna, así debía ser la distancia del paso entre sus fustes, por tanto, a menor altura la

modalidad de intercolumnio debía tener más diámetros de distancia. La idea era que el paso entre columnas fuera el mayor posible, siempre manteniendo garantizada la seguridad de la construcción. Así, en este tratado se recomienda por ejemplo que un teatro tenga un intercolumnio de 2,75 diámetros y, sin embargo, para el peristilo de las viviendas podía llegar a un intercolumnio de 4 diámetros y, por tanto, el mayor paso posible entre columnas. Estas recomendaciones se hacían en base a la distribución y simetría de las construcciones, pero de alguna manera afectaba al ancho de los recorridos de evacuación de los edificios.

2.2.1. Evolución normativa de la Seguridad en caso de Incendio

El campo de la ingeniería de protección contra incendios tiene una larga historia de desarrollo de reglamentos en respuesta a eventos trágicos [36]. La investigación de tales sucesos a menudo apunta a un pequeño conjunto de causas fundamentales y tras su análisis, los comités de expertos que redactan los códigos de construcción incorporan nuevas exigencias que tratan de evitar en la medida de lo posible que los sucesos acontecidos se repitan. A continuación en la Tabla 3 se establece una línea temporal en la adaptación normativa de la seguridad contra incendios en los Estados Unidos [36] en relación con sucesos e incendios de especial importancia.

Tabla 3: Línea temporal de sucesos y normativa de seguridad en los Estados Unidos

1896		Fundación de la NFPA ¹⁰
1903	Incendio	Teatro Iroquois (Illinois)
1904		Incorporación de expertos a los comités NFPA
1911	Incendio	Triangle Shirtwaist (Nueva York) Primera oficina de prevención de incendios de la ciudad de Nueva York
1913	Suceso	Italian Hall (Michigan) NFPA constituye el Comité de la Seguridad Humana
1927		Primera edición de NFPA 101 ¹¹ Primera edición del <i>Uniform Building Code</i>
1929		En la NFPA 101 se incluye el capítulo sobre la ocupación en locales de pública concurrencia ¹²
1940	Incendio	Rhythm Club (Mississippi)
1942	Incendio	Cocoanut Grove (Massachusetts)
1944	Incendio	Ringling Brothers (Connecticut)
1945		Primera edición del <i>Standard Building Code</i>
1950		Primera edición del <i>BOCA</i> ¹³ <i>Building Code</i>
1958	Incendio	Our Lady of Angels (Illinois)
1961	Incendio	Hospital Hartford (Connecticut)
1977	Incendio	Beverly Hills Supper Club (Kentucky)
1978		<i>BOCA</i> introduce la obligatoriedad en puertas de la barra antipánico en locales de pública concurrencia.
1980	Incendio	MGM Grand (Nevada)
1981		NFPA 101 introduce la obligación de instalar rociadores en la mayoría de los locales de pública concurrencia.
2000		Primera edición del ICC ¹⁴ <i>International Building Code</i>
2001		Primera edición del ICC <i>International Performance Code</i>
2003	Incendio	E2 Nightclub
	Incendio	Station Nightclub NFPA introduce la obligación de instalar rociadores en nightclubs

¹⁰ National Fire Protection Association

¹¹ Código para la seguridad de la vida

¹² NFPA define *Assembly occupancies* o *Pública concurrencia* a la reunión de 50 o más personas para deliberar, rezar, divertirse o esperar transporte. También es utilizada en locales de diversión como salones de actos, salas de baile, salas de exposiciones o similares, independientemente del número de ocupantes

¹³ Building Officials Code Administrators

¹⁴ International Code Council

La normativa en España no es ajena a estos cambios como respuesta a sucesos relacionados con incendios.

- Real Decreto 824/1982¹⁵

Se publicó como consecuencia de la descoordinación entre los diferentes cuerpos de bomberos en grandes incendios debido a los distintos tipos de racor utilizados. En la exposición y motivos del Real Decreto se indica lo siguiente:

...cuando con ocasión de algún gran incendio al acudir diversos servicios de extinción de incendios en misiones de ayuda mutua, se han encontrado imposibilitados de actuar, por no tener todos ellos el mismo tipo de conexión.

Por cuanto antecede, se estima necesario e imprescindible restablecer la unificación en el empleo de tipos de conexión para las mangueras de los servicios de extinción de incendios.

- Orden de 25 de septiembre de 1979 sobre prevención de incendios en establecimientos turísticos.

Se publicó dos meses después del incendio en el Hotel Corona de Aragón de Zaragoza con el objetivo de subsanar en el ámbito del uso residencial público todas las carencias en diseño y controles que motivaron el suceso y sus consecuencias. [37] [38].

- Orden de 24 de octubre de 1979 sobre Protección Anti-incendios en los Establecimientos Sanitarios.

Se publicó tras el incendio en el Hospital Materno Infantil de la Ciudad Sanitaria Virgen del Rocío de Sevilla. En la exposición y motivos de la Orden se indica lo siguiente:

¹⁵ Real Decreto 824/1982, de 26 de marzo, por el que se determinan los diámetros de las mangueras contra incendios y sus racores de conexión.

El creciente riesgo de incendio en los Establecimientos Sanitarios [...], hace necesario poner en práctica un plan de adecuación de sus servicios de Prevención y Extinción a las exigencias de seguridad actuales.

La normativa local y estatal a su vez se ha ido adaptando tanto a la resolución de problemas que se han ido detectando en los informes de los incendios, pero también se han ido actualizando según avanzan tanto la técnica como la investigación internacional en materia de protección contra incendios. Como ejemplo de la evolución normativa local, a continuación, se exponen los antecedentes históricos más relevantes en materia de seguridad en caso de incendio en Madrid. [39].

Tabla 4: Antecedentes de la Normativa de Seguridad en caso de Incendio. Ciudad de Madrid

Año	Normativa
1577	Se adopta por el Consejo de la Villa un acuerdo sobre fuegos que puede ser considerado como la creación del Servicio Contra Incendios
1613	Segundo acuerdo más amplio que el anterior, especificando una serie de obligaciones y sanciones para los oficios implicados, así como la decisión de comprar ciertos materiales y unas primeras intenciones de prevención.
1789	Se promulga una "Instrucción sobre Incendios", aprobada por el Consejo del rey Carlos III, recopilación de órdenes anteriores que tuvo gran importancia y que se envió a las colonias de América.
1985	Se proyecta la creación de una compañía de Bomberos Voluntarios como ayuda al servicio existente, que sin embargo no se hizo realidad hasta veinte años más tarde.
1982	Se crea la Sociedad de Seguros de Incendios, que ofrece sus servicios y autorización para intervenir en los siniestros
1841	Se aprueba un Reglamento de Policía Urbana que recoge normas para la prevención y actuación de incendios.
1927	Se sustituye el material de tracción animal por material para tracción mecánica. Se aprueba el Primer Reglamento Orgánico del Cuerpo de Bomberos de Madrid.
1976	Se aprueba la Ordenanza Primera de Prevención de Incendios

En el ámbito de la normativa estatal de seguridad en caso de incendio se expone a continuación una relación de la regulación más representativa

Tabla 5: Antecedentes de la Normativa de Seguridad en caso de Incendio

Decreto 3565/1972, de 23 de diciembre, por el que se establecen las Normas Tecnológicas de la Edificación NTE
Orden de 26 de febrero de 1974. Norma Tecnológica NTE-IPF, "Instalaciones de Protección contra el Fuego"
Orden de 27 de septiembre de 1974 por la que se desarrolla el Decreto 3565/1972, de 23 de diciembre, sobre Normas Tecnológicas de la Edificación
Real Decreto 1650/1977, de 10 de junio, sobre Normativa de la Edificación
Orden de 28 de julio. de 1977 por la que se desarrolla el Real Decreto 1650/1977, de 10 de junio; sobre Normativa da la Edificación
Real Decreto 2059/1981, de 10 de abril, por el que se aprueba la Norma Básica de la Edificación. «Condiciones de protección contra incendio en los Edificios»
Orden de 11 de marzo de 1981 por la que se aprueba la Instrucción Técnica Complementaria MIE-AP-I del Reglamento de Aparatos a Presión.
Orden de 7 de noviembre de 1983 por la que le aprueba la Instrucción Técnica Complementaria MIE-AP-IO del Reglamento de Aparatos a Presión referente a depósitos criogénicos
Real Decreto 279/1991, de 1 de marzo, por el que se aprueba la Norma Básica de la Edificación «NBE.CPI/91: Condiciones de protección contra incendios en los edificios»
Real Decreto 1942/1993, de 5 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones de Protección Contra Incendios.
Real Decreto 2177/1996, de 4 de octubre, por el que se aprueba la Norma Básica de la Edificación "NBE-CPI/96: Condiciones de protección contra incendios de 105 edificios»
Real Decreto 786/2001, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Seguridad contra incendios en los establecimientos industriales
Real Decreto 2267/2004, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales.
Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación.
Real Decreto 513/2017, de 22 de mayo, por el que se aprueba el Reglamento de instalaciones de protección contra incendios.

2.2.2. Enfoques normativos

La normativa dependiendo del enfoque en la que se fundamenta se clasifica como prescriptiva o prestacional.

Normativa prescriptiva

En el ámbito tecnológico de la edificación, es aquella en la que se indica expresamente las condiciones de seguridad que son de obligado cumplimiento para los edificios.

Como ejemplo, la NBE-CPI/96¹⁶ incluida en el Real Decreto 2177/1996, era una norma prescriptiva. Para alcanzar el cumplimiento del objetivo de esta norma, los edificios debían reunir las siguientes exigencias:

- Proteger a sus ocupantes frente a los riesgos originados por un incendio
- Prevenir daños en los edificios o establecimientos próximos a aquel en el que se declare un incendio
- Facilitar la intervención de los bomberos y de los equipos de rescate, teniendo en cuenta su seguridad.

Estas exigencias, salvo casos excepcionales que se justificasen por la singularidad de la edificación, debían cumplir íntegramente con las prescripciones del articulado.

Normativa prestacional

Se establece el nivel de seguridad, pero dando libertad al técnico competente para buscar la solución para cumplirlo. Como ejemplo, el Documento Básico de Seguridad en caso de Incendio, DB-SI del Código Técnico de la Edificación¹⁷. El objetivo de este Documento Básico consiste en reducir a límites aceptables el riesgo de que los usuarios de un edificio sufran daños derivados de un incendio de origen accidental, como consecuencia de las

¹⁶ Real Decreto 2177/1996, de 4 de octubre, por el que se aprueba la Norma Básica de la Edificación "NBE-CPI/96: Condiciones de protección contra incendios de 105 edificios».

¹⁷ Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación.

características de su proyecto, construcción, uso y mantenimiento. El objetivo se alcanza si se cumplen seis exigencias básicas:

- Propagación interior: Se limitará el riesgo de propagación del incendio por el interior del edificio.
- Propagación exterior: Se limitará el riesgo de propagación del incendio por el exterior, tanto en el edificio considerado como a otros edificios.
- Evacuación de ocupantes: El edificio dispondrá de los medios de evacuación adecuados para que los ocupantes puedan abandonarlo o alcanzar un lugar seguro dentro del mismo en condiciones de seguridad.
- Instalaciones de protección contra incendios: El edificio dispondrá de los equipos e instalaciones adecuados para hacer posible la detección, el control y la extinción del incendio, así como la transmisión de la alarma a los ocupantes.
- Intervención de bomberos: Se facilitará la intervención de los equipos de rescate y de extinción de incendios.
- Resistencia al fuego de la estructura: La estructura portante mantendrá su resistencia al fuego durante el tiempo necesario para que puedan cumplirse las anteriores exigencias básicas

El Documento Básico DB-SI especifica parámetros objetivos y procedimientos cuyo cumplimiento asegura la satisfacción de las exigencias básicas y la superación de los niveles mínimos de calidad propios del requisito básico de seguridad en caso de incendio.

Por tanto, existen dos opciones para cumplir con las exigencias básicas.

Enfoque prescriptivo, adoptando las soluciones técnicas donde se exponen los parámetros y procedimientos recogidos en el propio Documento Básico Seguridad en caso de Incendio.

Enfoque prestacional, adoptando soluciones alternativas, entendidas como aquellas que no están contempladas total o parcialmente en el DB-SI.

El técnico redactor del proyecto de edificación debe justificar que las soluciones alternativas son, al menos, equivalentes a las soluciones técnicas expuestas en el DB-SI, todo ello con el consenso del promotor y del resto de los agentes de la edificación. Las soluciones alternativas propuestas deben ser aprobadas por la autoridad de control correspondiente.

Cláusula de Seguridad Equivalente

Como se ha podido ver, en la práctica no existen enfoques puros prescriptivos o puros prestacionales. Por lo general, las normas prescriptivas tienen un cierto grado de flexibilidad incorporando la denominada *Clausula de Seguridad Equivalente* de tal manera que el técnico competente tiene capacidad para dar soluciones que pueda demostrar tienen el mismo o mayor grado de seguridad que las exigencias de la norma. Debido a la complejidad de algunas edificaciones y de las actividades que se realizan en su interior, existen casos en que la normativa no puede aplicarse de manera directa [40].

A continuación, se exponen algunos casos de edificaciones en los que la normativa no puede aplicarse de manera directa.

- Edificios singulares como terminales aeroportuarias, estaciones de ferrocarril o intercambiadores de transportes.

- Edificios con actividades diversas como pabellones de usos múltiples.
- Edificios industriales o con procesos productivos complejos como almacenamientos robotizados, aparcamientos robotizados.
- Intervención o cambio de uso en edificio existente donde la solución no es viable técnica o económicamente.
- Edificios catalogados como patrimonio histórico artístico.

El cumplimiento normativo de los edificios en materia de seguridad en caso de incendio se valora en términos cuantitativos tales como la inclusión de un determinado número de dispositivos de extinción, distancias de los recorridos de evacuación, número de salidas o el ancho de estas. La cláusula de seguridad equivalente permite el uso de alternativas que puedan justificar el cumplimiento de las exigencias básicas de la norma en casos excepcionales y siempre como consecuencia de la singularidad del edificio o la actividad. Estas alternativas deben ser admitidas por la autoridad de control.

2.2.3. Normativa Vigente de Seguridad en caso de Incendio

A continuación, se relacionan las principales normas estatales de obligado cumplimiento tanto para el desempeño de las instalaciones de protección contra incendios, la normativa de actividades industriales, sectoriales o específicas y la edificación.

- Reglamento de instalaciones de protección contra incendios¹⁸. Se aplica al diseño, instalación y mantenimiento de los sistemas de protección activa¹⁹ contra incendios.
- Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales²⁰. Se aplica en los edificios de uso industrial definidos en el artículo 3.1 de la Ley de Industria²¹, los almacenamientos industriales, así como los almacenamientos con una carga de fuego total superior a 3.000.000 de MJ.
- MIE APQ 0 del Reglamento de Almacenamiento de Productos Químicos y sus Instrucciones Técnicas Complementarias²². Establece las prescripciones técnicas a las que han de ajustarse el almacenamiento, carga, descarga y trasiego de los líquidos inflamables y combustibles y de gases licuados inflamables en recipientes fijos
- MIE APQ 1 del Reglamento de Instalaciones petrolíferas²³. Establece los requisitos de seguridad contra incendios en instalaciones de refino, almacenamiento y distribución de los productos carburantes y combustibles líquidos.
- ITC-RAT 14 e ITC-RAT 15 del Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en instalaciones eléctricas de alta tensión. Contemplan las instalaciones de protección contra incendios para edificios o construcciones destinados a alojar centros

¹⁸ Real Decreto 513/2017, de 22 de mayo, por el que se aprueba el Reglamento de instalaciones de protección contra incendios

¹⁹ Los sistemas de protección activa contra incendios son aquellos cuyas funciones son la detección, control y extinción de un incendio

²⁰ Real Decreto 2267/2004, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales.

²¹ Ley 21/1992, de 16 de julio, de Industria.

²² Real Decreto 656/2017, de 23 de junio, por el que se aprueba el Reglamento de Almacenamiento de Productos Químicos y sus Instrucciones Técnicas Complementarias MIE APQ 0 a 10.

²³ Instrucción Técnica Complementaria de Almacenamiento de líquidos inflamables y combustibles

de transformación y aparata de alta tensión y las instalaciones eléctricas de exterior.

- Real Decreto 842/2013, de 31 de octubre, por el que se aprueba la clasificación de los productos de construcción y de los elementos constructivos en función de sus propiedades de reacción y de resistencia frente al fuego.
 - Documento Básico de Seguridad en caso de Incendio (DB-SI) del Código Técnico de la Edificación (CTE).
 - Además de la normativa estatal, existen numerosas normativas de reconocido prestigio que son referencia para el diseño de instalaciones y edificios, como las normas UNE²⁴ publicadas por AENOR, los Documentos Técnicos publicados por Cepreven²⁵ o las Guías de Protección contra incendios de CFP Europe²⁶.

Dada la gran variedad de elementos o dispositivos que por sus características particulares requieren una especial atención en materia de protección contra incendios, fabricantes y distribuidores elaboran fichas de datos de seguridad de sus productos. Como ejemplo de ficha de fabricante [41], las baterías de Ion-Litio contienen electrolitos líquidos inflamables que pueden emitir gases, inflamarse o producir chispas cuando se someten a temperaturas elevadas si están dañadas o no se utilizan correctamente.

²⁴ Asociación Española de Normalización. Publican documentos de aplicación voluntaria que contienen especificaciones técnicas basadas en los resultados de la experiencia y del desarrollo tecnológico

²⁵ Asociación cuya finalidad es fomentar, en materia de prevención, el intercambio de informaciones y experiencias con organismos, entidades y personas físicas.

²⁶ Confederation of Fire Protection Associations Europe.

2.2.4. Normativa Vigente de Planificación de la Evacuación

La Constitución Española en su artículo 30.4 establece que “mediante ley podrán regularse los deberes de los ciudadanos en los casos de grave riesgo, catástrofe o calamidad pública.”. Las obligaciones que se imponen bajo el paraguas de la Constitución mediante decretos o leyes son tanto para los poderes públicos como para los ciudadanos, que deben participar de la prevención y la intervención cuando sea necesario.

Antecedentes en el ámbito de la Autoprotección

A continuación, se presentan antecedentes normativos dentro del ámbito de la Autoprotección.

- Artículo 17.2 de la Ley 45/1959, de 30 de julio de Orden Público. Se expone que “la Autoridad y sus Agentes podrán requerir la ayuda y colaboración de otras personas y disponer de lo necesario en auxilio de las víctimas”
- Orden de 29 de noviembre de 1984 por la que se aprueba el Manual de Autoprotección para el desarrollo del Plan de Emergencia contra Incendios y de Evacuación de Locales y Edificios.
- Ley 2/1985, de 21 de enero, sobre Protección Civil. Se establece la actuación de los poderes públicos, organizaciones, empresas y de los propios ciudadanos en caso de grave riesgo colectivo, calamidad pública o catástrofe extraordinaria. Dentro de la exposición y motivos, en su apartado IV, mencionando la Autoprotección se expone que “debe plantearse, no sólo de forma que los ciudadanos alcancen la protección del

Estado y de los otros poderes públicos, sino procurando que ellos estén preparados para alcanzar por sí mismos tal protección.”

En sus artículos 5 y 6, se recoge la obligación del Gobierno de establecer un catálogo de aquellas actividades que puedan dar origen a una situación de emergencia y las obligaciones de los titulares de dichas actividades.

En el capítulo IV, artículo 14.b se indica como acciones preventivas en materia de Protección Civil “la promoción y control de la autoprotección corporativa y ciudadana.”. Esta obligación implica que los titulares de las actividades debían disponer los medios y recursos adecuados para la prevención de riesgos, alarma, planificación de la evacuación y socorro.

No hay normativa que prescriba cómo evacuar un edificio, pero sí se dispone de normativa que expone el aspecto formal que debe tener la documentación de la planificación de la evacuación y los derechos y deberes de los ciudadanos en caso de emergencia, así como las condiciones que deben cumplir los edificios.

A continuación, se relacionan las normas que exigen un cumplimiento en la seguridad en caso de incendio.

Código Técnico de la Edificación

El Código Técnico de la Edificación, en adelante CTE, es el Reglamento aprobado por el Real Decreto 314/2006. Es el marco normativo donde se regulan las exigencias básicas de calidad que deben cumplir los edificios, incluidas sus instalaciones y las exigencias básicas

para satisfacer los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad dispuestas en la Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación.

El CTE establece exigencias básicas, siendo el Documento Básico de Seguridad en caso de Incendio, en adelante DB-SI, el que proporciona procedimientos que permiten acreditar el cumplimiento con suficientes garantías técnicas en materia de lucha contra incendios y evacuación de personas. En el DB-SI se exponen los medios que debe disponer un edificio para la evacuación, pero también deben cumplirse las exigencias básicas de los demás requisitos básicos que aparecen en el CTE, por lo que deben tenerse en cuenta la aplicación de las exigencias de cada Documento Básico correspondiente. En particular, las exigencias relacionadas con la seguridad de las personas al desplazarse por el edificio, tanto en circunstancias normales como en situaciones de emergencia, se vinculan al requisito básico *Seguridad de Utilización y Accesibilidad*. Por ello, las soluciones aplicables a los elementos de circulación como pasillos, escaleras o rampas, así como a la iluminación normal y al alumbrado de emergencia figuran en el Documento Básico de Seguridad de Utilización y Accesibilidad, (DB-SUA). Por otro lado, dentro de los Criterios Generales de Aplicación del DB-SI, se expone lo siguiente: “En edificios que deban tener un plan de emergencia conforme a la reglamentación vigente, éste preverá procedimientos para la evacuación de las personas con discapacidad en situaciones de emergencia”. Todos los edificios donde exista una relación laboral según la Ley de Prevención de Riesgos Laborales, tal como se verá a continuación, debe disponer de un plan de emergencia que incluya procedimientos para la evacuación de personas, incluyendo las personas de colectivos vulnerables como las personas con discapacidad o personas con movilidad reducida.

Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales

Se establecen las condiciones que debe cumplir el diseño del edificio²⁷ en función de la ocupación y la tipología del edificio industrial.

Se mencionan aspectos como el número de salidas, los recorridos de evacuación o la iluminación, pero no se hace referencia a los procedimientos de evacuación del edificio.

En materia de evacuación, determina en primer lugar la ocupación que denomina P . La expresión p representa el número de personas que ocupa el sector de incendio, de acuerdo con la documentación laboral que legalice el funcionamiento de la actividad.

$$P = 1,10 p, \text{ cuando } p < 100$$

$$P = 110 + 1,05 (p - 100), \text{ cuando } 100 < p < 200.$$

$$P = 215 + 1,03 (p - 200), \text{ cuando } 200 < p < 500$$

$$P = 524 + 1,01 (p - 500), \text{ cuando } 500 < p.$$

Para definir los elementos de la evacuación como origen de evacuación, recorridos de evacuación, altura de evacuación o salidas se toma como referencia la Terminología del DB-SI. Dependiendo de la tipología del edificio, se establecen distintas medidas para la evacuación. A modo de ejemplo, se toma la tipología B. Esta tipología se corresponde con un establecimiento industrial que ocupa totalmente un edificio que está adosado a otro u otros edificios, o a una distancia igual o inferior a tres metros de otro u otros edificios, de otro establecimiento, ya sean estos de uso industrial o bien de otros usos.

²⁷ Punto 6 del Anexo II, Requisitos constructivos de los establecimientos industriales según su configuración, ubicación y nivel de riesgo intrínseco

En este caso concreto, el número de salidas que se establecen por recorrido de evacuación en los sectores de incendio se determinan según la Tabla 6.

Para poder diseñar la disposición de escaleras, dimensionamiento de salidas, pasillos y escaleras o la señalización e iluminación, se toma como referencia el CTE.

Tabla 6: Recorrido de evacuación según número de salidas en Establecimientos Industriales

Nivel de Riesgo	1 salida. Recorrido único	2 salidas alternativas
Bajo ²⁸	35 m ²⁹	50
Medio	25 m ³⁰	50
Alto	No aplica	25

Ley de Prevención de Riesgos Laborales

Con el fin de identificar cuando es preceptivo disponer de un Plan de Emergencia y, por tanto, prever procedimientos para la evacuación de las personas con discapacidad, es necesario acudir a la Ley de Prevención de Riesgos Laborales³¹.

En su artículo 20 se regulan las medidas de emergencia, indicándose lo siguiente:

²⁸ Para actividades de producción o almacenamiento clasificadas como riesgo bajo nivel 1, en las que se justifique que los materiales implicados sean exclusivamente de clase A y los productos de construcción, incluidos los revestimientos, sean igualmente de clase A, podrá aumentarse la distancia máxima de recorridos de evacuación hasta 100 m.

²⁹ La distancia se podrá aumentar a 50 m si la ocupación es inferior a 25 personas.

³⁰ La distancia se podrá aumentar a 35 m si la ocupación es inferior a 25 personas.

³¹ Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales.

El empresario, teniendo en cuenta el tamaño y la actividad de la empresa, así como la posible presencia de personas ajenas a la misma, deberá analizar las posibles situaciones de emergencia y adoptar las medidas necesarias en materia de primeros auxilios, lucha contra incendios y evacuación de los trabajadores.

Por tanto, existe obligación de disponer de un Plan de Emergencia siempre que haya una relación laboral dentro del ámbito de aplicación de la Ley de Prevención de Riesgos Laborales.

Se puede definir Plan de Emergencia [42] como la “planificación y organización humana para la utilización óptima de los medios técnicos previstos con la finalidad de reducir al mínimo las posibles consecuencias humanas y/o económicas que pudieran derivarse de la situación de emergencia”. El Plan de Emergencia busca hacer eficientes los recursos disponibles, es decir, recursos humanos y materiales adecuados para la evacuación de los trabajadores y personas ajenas a la empresa dispuestos por el empresario. Dentro de los recursos que debe poner a disposición el empresario, éste debe designar personal encargado de poner en práctica las medidas contempladas en el Plan de Emergencia. En algunos casos este personal necesitará una formación específica y disponer del material adecuado, en función de los riesgos.

Para facilitar la evacuación de un edificio, el empresario puede designar entre sus trabajadores un Equipo de Alarma y Evacuación o E.A.E. Los principales cometidos de los componentes del E.A.E. son los siguientes:

- Informar a los ocupantes de la emergencia y qué deben hacer en su caso, como evacuación o confinamiento en una zona de seguridad o un sector alternativo.

- Dirigir a los ocupantes hacia las salidas de emergencia correspondientes de manera ordenada.
- Comprobar que los recorridos de evacuación estén libres de obstáculos.
- Ofrecer apoyo e información en los puntos designados en los Planes de Evacuación como los más conflictivos.
- Regular el flujo de personas para evitar aglomeraciones y bloqueos en los recorridos.
- Verificar que no ha quedado ninguna persona en el interior del edificio.

Los recursos materiales son los propios de la detección, alarma y lucha contra el incendio, pero además pueden disponerse medidas adicionales, tales como una señalización adaptada a personas con discapacidad intelectual o sillas de evacuación para personas con movilidad reducida.



Figura 1: Pruebas con silla de evacuación³²

³² Fuente: Elaboración propia

La actividad protectora de la seguridad y la salud, derivada de la Ley de Prevención de Riesgos Laborales no cubre los requerimientos de prevención o reducción de riesgos para la población en general que sí contempla la Ley del Sistema de Protección Civil³³.

Ley del Sistema de Protección Civil.

El objeto es establecer un instrumento para asegurar la coordinación, la cohesión y la eficacia de las políticas públicas de protección civil. Todos los residentes en el territorio español tienen derecho a ser atendidos en caso de catástrofe y, a su vez, los ciudadanos tienen derecho a participar, directamente o a través de entidades representativas de sus intereses, en la elaboración de las normas y planes de protección civil. La participación de los ciudadanos en las tareas de protección civil podrá canalizarse a través de las entidades de voluntariado.

Los miembros del voluntariado podrán colaborar en la gestión de las emergencias, como expresión de participación ciudadana en la respuesta social a estos fenómenos, de acuerdo con lo que establezcan las normas aplicables

Norma Básica de Autoprotección

Se entiende como autoprotección al sistema de acciones y medidas encaminadas a prevenir y controlar los riesgos sobre las personas y los bienes, a dar respuesta adecuada a las posibles situaciones de emergencia y a garantizar la integración de estas actuaciones con el sistema público de protección civil. Estas acciones y medidas deben ser adoptadas por los

³³ Ley 17/2015, de 9 de julio, del Sistema Nacional de Protección Civil

titulares de las actividades, públicas o privadas, con sus propios medios y recursos, dentro de su ámbito de competencia. La Norma Básica de Autoprotección³⁴ define y desarrolla la autoprotección y establece la obligación de elaborar e implantar materialmente y mantener operativos los Planes de Autoprotección. Se determina además el contenido mínimo que deben incorporar estos planes. Los titulares en régimen de arrendamiento, concesión o contrata, que se encuentren físicamente en los centros, establecimientos, espacios, instalaciones y dependencias que deban disponer de plan de autoprotección también son responsables y tienen obligación de adoptar estas medidas.

Dada la complejidad de la materia, el Plan de Autoprotección debe ser elaborado por un técnico competente capacitado para dictaminar sobre aquellos aspectos relacionados con la autoprotección frente a los riesgos a los que esté sujeta la actividad.

El Plan de Autoprotección se debe elaborar para todas las actividades comprendidas en el Anexo I de la Norma Básica de Autoprotección, aplicándose con carácter supletorio en el caso de las Actividades con Reglamentación Sectorial Específica. A continuación, se relacionan de manera no exhaustiva las actividades con obligación de disponer de un plan de Autoprotección se determina en el Anexo I de la Norma.

³⁴ Real Decreto 393/2007, de 23 de marzo, por el que se aprueba la Norma Básica de Autoprotección de los centros, establecimientos y dependencias dedicados a actividades que puedan dar origen a situaciones de emergencia y posteriores modificaciones.

Tabla 7: Actividades sujetas a Plan de Autoprotección. Norma Básica de Autoprotección

Actividades	Tipos de actividades	Ejemplos
Actividades con reglamentación Sectorial específica	Actividades industriales, de almacenamiento y de investigación	Sustancias Peligrosas Explosivos Residuos peligrosos Explotaciones e industrias minería Organismos Modificados Genéticamente Sustancias Biológicas Peligrosas
	Actividades de infraestructuras de transporte	Túneles Puertos comerciales Aeropuertos, aeródromos
	Actividades e infraestructuras energéticas	Nucleares y Radiactivas Hidráulicas
	Actividades de espectáculos públicos y recreativas Otras actividades reguladas	espacios cerrados espacios abiertos Otros
Actividades sin reglamentación sectorial específica	Actividades industriales y de almacenamiento	$Qs^{35} \geq 13.600 \text{ MJ/m}^2$ sustancias peligrosas Instalaciones frigoríficas Instalaciones petrolíferas
	Actividades e infraestructuras de transporte	Estaciones e Intercambiadores de Transporte Terrestre Líneas Ferroviarias metropolitanas Túneles Ferroviarios Autopistas de Peaje Áreas de Estacionamiento para el Transporte de Mercancías Peligrosas Puertos comerciales
	Actividades e infraestructuras energéticas	Producción Energía Eléctrica $\geq 300 \text{ MW}$ Generación y transformación en alta tensión.
	Actividades sanitarias	Hospitalización ≥ 200 camas Altura de evacuación $\geq 28 \text{ m}$ Ocupación ≥ 2.000 personas.
	Actividades docentes	Especialmente destinadas a personas discapacitadas Altura de evacuación $\geq 28 \text{ m}$ Ocupación ≥ 2.000 personas
	Actividades residenciales públicas	Personas movilidad reducida ≥ 100 Altura de evacuación $\geq 28 \text{ m}$ Ocupación ≥ 2.000 personas
	Otras actividades	Otras actividades altura de evacuación $\geq 28 \text{ m}$ Otras actividades con ocupación ≥ 2.000 personas Instalaciones desmontables ≥ 2.500 personas Camping ≥ 2.000 personas Aire libre ≥ 20.000 personas

³⁵ Carga de fuego ponderada y corregida

Además de las actividades de la Tabla 4, y dado el carácter de mínimos de la Norma Básica de Autoprotección, es posible realizar Planes de Autoprotección en los siguientes casos:

- Las Administraciones Públicas competentes podrán exigir la elaboración e implantación de planes de autoprotección a los titulares de actividades no incluidas entre estas actividades del Anexo I, cuando presenten un especial riesgo o vulnerabilidad.
- Las comunidades autónomas y las entidades locales pueden dictar, dentro del ámbito de sus competencias, las disposiciones necesarias para establecer sus propios catálogos de actividades que tienen obligación de disponer de Plan de Autoprotección, así como las obligaciones de autoprotección que se prevean para cada caso. En particular, pueden ampliar dichas obligaciones de autoprotección a actividades, centros, establecimientos, espacios, instalaciones y dependencias donde se desarrollan actividades no incluidas en el Anexo I, así como desarrollar los procedimientos de control e inspección.
- De manera voluntaria, los promotores o titulares de las actividades pueden elaborar Planes de Autoprotección en actividades no sujetas a obligación. En caso de disponer de Plan de Autoprotección, las compañías aseguradoras pueden vincular el coste de la cobertura del seguro a las medidas adoptadas.

Analizada la Norma Básica de Autoprotección podemos determinar que los objetivos generales que se pretenden alcanzar por parte del técnico competente al elaborar un Plan de Autoprotección son:

- Prever todas las posibles situaciones de emergencia y su respuesta.
- Integrar el Plan de Autoprotección en otros de ámbito superior.
- Conocer y documentar en detalle el edificio, local o establecimiento, de sus recorridos de evacuación, de sus instalaciones, de los sectores de incendio, de las zonas de refugio y de los locales de riesgo especial.
- Conocer y documentar en detalle las actividades que se desarrollan en el edificio y analizar y evaluar sus riesgos propios y externos. En consecuencia, se requiere un técnico competente capacitado para dictaminar sobre aquellos aspectos relacionados con los riesgos a los que esté sujeta la actividad.
- Conocer en detalle el perfil de los usuarios del edificio y prever las medidas adecuadas, en especial en el caso de los colectivos más vulnerables como las personas con discapacidad o personas con movilidad reducida.
- Establecer las comunicaciones interiores y exteriores, así como los medios adecuados para garantizar la intervención de la ayuda externa.
- Asegurar el funcionamiento de las instalaciones vinculadas a la seguridad y de los medios de protección.
- Asegurar la formación y disposición de los medios humanos adecuados, tales como los equipos de intervención propios o el E.A.E. mencionado anteriormente

Como resumen de los puntos anteriores y desde el enfoque de la evacuación en caso de incendio, para minimizar el riesgo de que los ocupantes puedan sufrir daños, es necesario que el técnico redactor tenga los conocimientos necesarios para elaborar un plan que disponga, de conformidad con el titular de la actividad, los recursos materiales y humanos más eficaces y adecuados teniendo en cuenta el edificio, sus instalaciones, las actividades que se realizan y el perfil de los usuarios. El conocimiento del perfil de los usuarios facilita la previsión del comportamiento [3].

3. Planificación integral de la Seguridad en caso de Incendio

La planificación integral de la seguridad en caso de incendio es un campo multidisciplinar en el que participan ciencias como la física y la química, la resistencia de materiales que analiza la firmeza de los elementos constructivos frente a la llama o el calor, incluyendo la propia estructura del edificio, la electrónica de los dispositivos de detección, control o comunicación, la mecánica de fluidos, así como el comportamiento humano. Por tanto, uno de los pilares fundamentales para reducir el riesgo de que el ocupante de un edificio sufra daños por causa de un incendio es conocer su comportamiento desde el momento en que se origina el fuego hasta que accede a una zona segura.

El estudio para minimizar los riesgos de que las personas puedan sufrir algún daño durante un incendio implica la identificación de los factores que influyen en el proceso de la evacuación: entorno, dinámica del incendio y perfil de los ocupantes. Estas tres áreas del conocimiento interactúan entre sí generando a su vez nuevos factores.

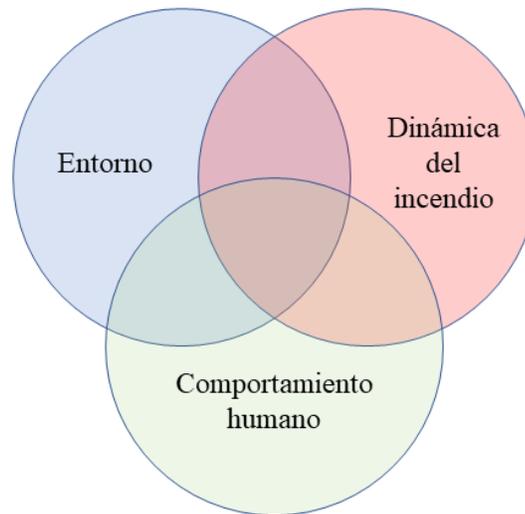


Figura 2: Interacción Entorno-Incendio-Comportamiento

3.1. Entorno

El entorno en el caso de estudio es un edificio, es decir, una construcción estable y permanente diseñada para ser habitada.

Las condiciones que debe cumplir el edificio para el cumplimiento de la seguridad en caso de incendio se imponen o bien con el DB-SI del CTE o bien con el Reglamento de Seguridad contra Incendios en Establecimientos Industriales.

En el caso del DB-SI, la clasificación del uso del edificio es el punto de partida a la hora de diseñar los elementos de evacuación e instalaciones de protección en caso de incendio, ya que las protecciones pasivas y activas de protección contra incendios en este documento se determinan en función del uso del edificio.

En la Tabla 8 se presentan de manera esquemática los distintos usos y ejemplos de las actividades que engloba cada uno.

Tabla 8: Clasificación de los usos según DB SI

Uso	Actividades	Ejemplos
Administrativo	Gestión y servicios	Oficinas, bancos, despachos, ambulatorio.
Aparcamiento	Estacionamiento de vehículos	Aparcamiento, lavado, puesta a punto
Comercial	Venta de productos al público y espacios asimilables	Tiendas, mercados, lavanderías, peluquerías
Docente	Destinado a docencia	Infantiles, primaria, secundaria, universitaria o formación profesional
Hospitalario	Hospitalización de 24 horas	Hospital, geriátricos
Residencial público	Alojamiento temporal	hoteles, hostales, residencias, pensiones, apartamentos turísticos
Residencial Vivienda	Alojamiento permanente	Unifamiliar, piso, apartamento

En esta clasificación, no están incluidos los edificios destinados a uso industrial.

Dependiendo del uso del edificio, éste deberá cumplir según el DB-SI unas condiciones para evitar la propagación interior y exterior del incendio, las condiciones para la evacuación de los ocupantes, las instalaciones de protección contra incendios, las condiciones para el acceso e intervención de los bomberos y la resistencia al fuego de la estructura.

Las condiciones que se deben cumplir para la evacuación de los ocupantes hacen referencia a:

- Compatibilidad de distintos usos en los elementos de evacuación
- Cálculo de la ocupación de los sectores de incendio
- Número de salidas y longitud de los recorridos de evacuación
- Dimensionado de los medios de evacuación

- Protección de las escaleras
- Puertas situadas en recorridos de evacuación
- Señalización de los medios de evacuación
- Control del humo de incendio
- Evacuación de personas con discapacidad en caso de incendio

En el Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales, las construcciones se denominan establecimientos, siendo establecimiento de uso industrial el conjunto de edificios, edificio, zona del edificio, instalación, espacio abierto o almacén utilizado bajo una titularidad diferenciada, cuya actividad pueda incluirse dentro del ámbito de aplicación de la Ley 21/1992 de Industria. También estarían los establecimientos destinados a almacenamiento industrial, los talleres de reparación y los estacionamientos de vehículos destinados al servicio de transporte de personas y transporte de mercancías, los servicios auxiliares o complementarios de las actividades anteriores y como ya se vio anteriormente, los almacenamientos de cualquier tipo cuando su carga de fuego total sea igual o superior a 3.000.000 de MJ.

En este Reglamento, la tipología de la construcción viene definida por la configuración, la ubicación con el entorno. De manera no exhaustiva se clasifican del siguiente modo:

- **Tipo A:** El establecimiento industrial ocupa parcialmente un edificio donde se ubica otro establecimiento de cualquier uso.
- **Tipo B:** El establecimiento industrial ocupa totalmente un edificio que está adosado a otro/s, o a una distancia igual o inferior a 3 m de otros edificios de cualquier uso.

- **Tipo C:** El establecimiento industrial ocupa totalmente un edificio, que está a una distancia mayor de 3 m. del edificio más próximo.
- Las configuraciones **Tipo D y E** carecen de un cerramiento completo.

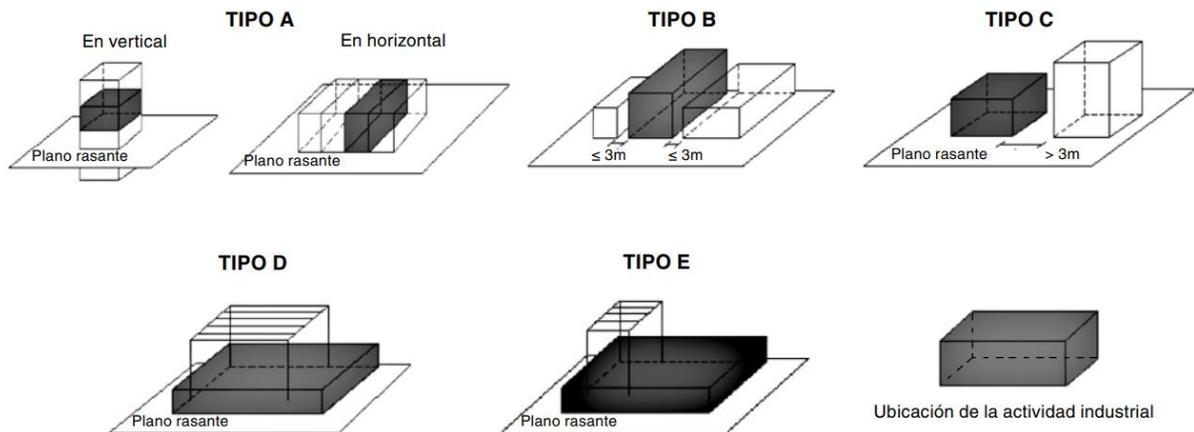


Figura 3: Configuraciones tipo en los establecimientos industriales. Fuente: NTP 831³⁶

Una vez conocidos los usos y tipologías de edificios, es necesario conocer los elementos constructivos cuya función o diseño están enfocados a la evacuación en caso de incendio.

En este caso de estudio, se utilizarán para el diseño del entorno virtual la misma terminología³⁷ del DB-SI. A continuación, se exponen algunos de los términos más representativos con una explicación no exhaustiva de su definición.

- **Altura de evacuación:** Es la máxima diferencia de cotas entre un *origen de evacuación* y la *salida de edificio*.

³⁶ Nota Técnica de Prevención 831. Reglamento de seguridad contra incendios en establecimientos industriales.

³⁷ DB SI. Anejo SI A

Dentro del propio DB SI la altura de evacuación influye en todos los aspectos de diseño tanto de protección pasiva como activa. Así mismo y tal como se expuso en la Tabla 4, la altura de evacuación superior a 28 m. determina la necesidad de que algunas actividades dispongan de Plan de Autoprotección.

La altura de evacuación influye de manera decisiva al planificar la evacuación de personas con movilidad reducida o personas con discapacidad tal como se expone posteriormente.

- **Escalera:** Es el elemento que enlaza planos a distinto nivel y también el único elemento para que los usuarios de un edificio evacuen por sus propios medios hasta una *zona de seguridad* cuando ésta se encuentra a distinto plano.

Dada su importancia, las escaleras pueden idearse como zonas de seguridad durante un tiempo determinado.

- **Escalera protegida:** Escalera de trazado continuo desde su inicio hasta su desembarco en planta de salida del edificio que, en caso de incendio, constituye un recinto suficientemente seguro para permitir que los ocupantes puedan permanecer en el mismo durante un determinado tiempo.

Está destinada exclusivamente a circulación y compartimentado del resto del edificio mediante elementos separadores EI 120³⁸. Además, debe contar con

³⁸ Anexo III. Clasificación en función de las características de resistencia al fuego de los elementos y productos de construcción. Real Decreto 842/2013, de 31 de octubre, por el que se aprueba la clasificación de los productos de construcción y de los elementos constructivos en función de sus propiedades de reacción y de resistencia frente al fuego

una protección frente al humo o bien mediante ventilación natural³⁹, por ejemplo, mediante ventanas practicables, ventilación mediante dos conductos independientes de entrada y de salida de aire dispuestos exclusivamente para esta función o bien mediante un sistema de presión diferencial⁴⁰.

La ventilación de la escalera protegida es esencial para que pueda ser un recorrido de evacuación válido en caso de incendio.

- **Escalera especialmente protegida:** Escalera que reúne las condiciones de escalera protegida y que además dispone de un *vestíbulo de independencia* diferente en cada uno de sus accesos desde cada planta.

La escalera abierta al exterior puede considerarse especialmente protegida y no disponer de *vestíbulo de independencia*.

- **Escalera abierta al exterior:** Escalera que dispone de huecos permanentemente abiertos al exterior en medidas tales que tiene una ventilación natural adecuada. La escalera abierta al exterior puede considerarse *escalera especialmente protegida*.

- **Vestíbulo de independencia:** Es un recinto de uso exclusivo para circulación situado entre dos o más recintos o zonas con el fin de aportar una mayor garantía de compartimentación contra incendios y que únicamente puede comunicar con los recintos o zonas a independizar, con aseos de planta y con ascensores.

³⁹ Extracción de humos basada en la fuerza ascensional de éstos debida a la diferencia de densidades entre masas de aire a diferentes temperaturas

⁴⁰ Sistema de ventiladores, conductos, aberturas y otros elementos característicos previstos con el propósito de generar una presión más baja en la zona del incendio que en el espacio protegido.

- **Espacio exterior Seguro:** Es aquel en el que se puede dar por finalizada la evacuación de los ocupantes del edificio. Este espacio cumple con unas dimensiones tales que permite la dispersión de los ocupantes del edificio, así como una amplia disipación de humo y calor.
- **Origen de evacuación:** Es todo punto de un edificio en el que puede haber un ocupante exceptuando los del interior de las viviendas u otros recintos con baja densidad de ocupación y cuya superficie total no exceda de 50 m², como pueden ser las habitaciones de hotel, residencia u hospital o los despachos de oficinas.
- **Recorrido de evacuación:** Es el recorrido que conduce desde un origen de evacuación hasta una *salida de planta*, situada en la misma planta considerada o en otra, o hasta una salida de edificio.
- **Salida de planta:** En líneas generales se considera *salida de planta* cualquiera de estas opciones.
 - El arranque de una escalera no protegida que conduce a una planta de salida del edificio.
 - El arranque de una escalera compartimentada como los sectores de incendio, o una puerta de acceso a una escalera protegida, a un pasillo protegido o al vestíbulo de independencia de una escalera especialmente protegida.
 - Una puerta de paso, a través de un vestíbulo de independencia, a un sector de incendio diferente que exista en la misma planta con las condiciones que indica el DB SI.
 - Una salida de edificio

La *salida de planta* puede estar, bien en la planta considerada o bien en otra planta diferente.

- **Zona de refugio:** Es una zona con superficie suficiente para el número de plazas que sean exigibles, de dimensiones 1,20 x 0,80 m para usuarios de sillas de ruedas o de 0,80 x 0,60 m para personas con otro tipo de movilidad reducida. Las zonas de refugio deben situarse, sin invadir la anchura libre de paso, en los rellanos de escaleras protegidas o especialmente protegidas, en los vestíbulos de independencia de escaleras especialmente protegidas, o en un pasillo protegido.

3.2. Dinámica del incendio

El NIST⁴¹ define la dinámica del incendio como “...el estudio de cómo la química, la ciencia del fuego, la ciencia de los materiales y las disciplinas de ingeniería mecánica de la mecánica de los fluidos y la transferencia de calor interactúan para influir en el comportamiento del fuego. En otras palabras, la dinámica del incendio es el estudio de cómo los fuegos comienzan, se propagan y se desarrollan.”

La NFPA 921⁴² define el fuego como “Un proceso de oxidación rápido, una reacción química que da como resultado la evolución de luz y calor en diferentes intensidades.”

La Real Academia de la Lengua lo define como un “fenómeno caracterizado por la emisión de calor y de luz, generalmente con llama.”

Uno de los principales parámetros para medir la actividad de un incendio y sus consecuencias es la temperatura que alcanza, es decir, es la magnitud física que expresa el

⁴¹ National Institute of Standards and Technology

⁴² NFPA 921 Guide for Fire and Explosion Investigations

nivel de calor de los cuerpos. La exposición al calor puede generar distintas afectaciones: golpe de calor, quemaduras en la piel y quemaduras en el sistema respiratorio [43]. El golpe de calor o hipertermia se produce cuando hay un aumento de temperatura por encima de la corporal normal que se considera entre los 35,0 °C y 37,0 °C. El golpe de calor impide al individuo regular y mantener la temperatura corporal de forma natural, afectando a funciones básicas y por tanto, causando trastornos en el comportamiento. Los efectos debidos a quemaduras tanto en la piel como en el sistema respiratorio también son causa de incapacidad y, por tanto, de modificación del comportamiento.

Para el estudio de la evacuación de las personas en un incendio es necesario conocer cómo afecta la temperatura a las personas. A continuación, se exponen distintos datos de referencia de temperaturas y las consecuencias sobre el cuerpo humano.

Tabla 9: Temperaturas y consecuencias que produce en el cuerpo humano

Temperatura	Consecuencia
37 °C	Promedio corporal de los humanos [44]
38 °C	Temperatura corporal típica de un bombero en una intervención [45]
43 °C	Temperatura corporal que puede causar la muerte [46]
44 °C	La piel humana siente dolor [47]
48 °C	Causa quemaduras de primer grado en la piel. [47]
54 °C	El agua caliente a esta temperatura causa lesiones con una exposición de 30 s. [48]
55 °C	Provoca en la que la piel humana ampollas y quemaduras de segundo grado [47]
62 °C	El tejido humano quemado se entumece. [47]
72 °C	El tejido de la piel humana se destruye instantáneamente. [47]
>300 °C	Carbonización de tejidos de protección sintéticas [49]
≥400 °C	Temperatura de los gases al comienzo de un flashover ⁴³ [50].
≈ 1000 °C	Temperatura de un recinto que está sufriendo un flashover [50].

En la relación de consecuencias de la Tabla 9 se menciona la clasificación de las quemaduras. Esta clasificación de las quemaduras [51] en la piel humana se hace de acuerdo con la profundidad de la lesión.

- **Quemaduras de primer grado:** Afectan solamente a la epidermis o capa externa de la piel. Causan dolor y enrojecimiento, pero no producen ampollas y desaparecen a los pocos días.

⁴³ Combustión súbita generalizada en incendios confinados

- **Quemaduras de segundo grado:** Afectan a la dermis o capas externa y media de la piel, conocida como dermis. Pueden causar dolor, enrojecimiento y ampolla e incluso causar cicatrices. Las más graves pueden necesitar un injerto de piel.
- **Quemaduras de tercer grado:** Afectan a las capas externa, media e interna de la piel, son muy dolorosas salvo aquellas que la propia quemadura destruye las células nerviosas sensibles al dolor. Causan cicatrices graves y generalmente se deben tratar con injertos de piel.

3.2.1. Teoría del incendio

Para que ocurra un incendio han de concurrir, de forma simultánea, la presencia de un combustible, un comburente y una fuente de energía [52].

El combustible es el material que arde, el comburente es la sustancia en la que arde el combustible y la fuente de energía es como su nombre indica, la energía necesaria que debe aportarse para iniciar la ignición. Cuando se tiene control sobre la reacción en cadena, es decir, hay un control sobre los tres componentes anteriores se puede determinar que es un fuego controlado y no un incendio. Un incendio es una combustión no deseada, pudiendo tener un origen único o varios puntos de origen. El desarrollo de los incendios en espacios confinados como es un edificio está determinado por la disponibilidad de combustible y comburente y se pueden distinguir diversas etapas:

- **Fase de ignición:** Se inicia el fuego. La reacción de la combustión no tiene llamas. Este periodo puede durar desde unos segundos a varias horas dependiendo de las condiciones de la combustión.

- **Fase de desarrollo:** Se produce un crecimiento en función de la energía desarrollada en la combustión. En esta fase tiene que haber una cantidad suficiente de combustible y comburente para mantener la combustión.
- **Fase de pleno desarrollo:** En esta fase el fuego está en su punto más alto pudiendo llegar a consumir el oxígeno.
- **Fase decaimiento:** En esta fase cada vez hay menos combustible disponible.

En la Figura 4 se muestra la curva de desarrollo del incendio más habitual en un recinto con un combustible limitado, pero sí existe un aporte ilimitado de oxígeno o comburente. A medida que el material combustible es atacado por el fuego, el nivel de energía aumenta hasta que todo el combustible disponible se quema, que sería la fase de pleno desarrollo. A partir de ese momento, y sin más combustible que aportar, se inicia la fase de decaimiento, el nivel de energía comienza a decaer.

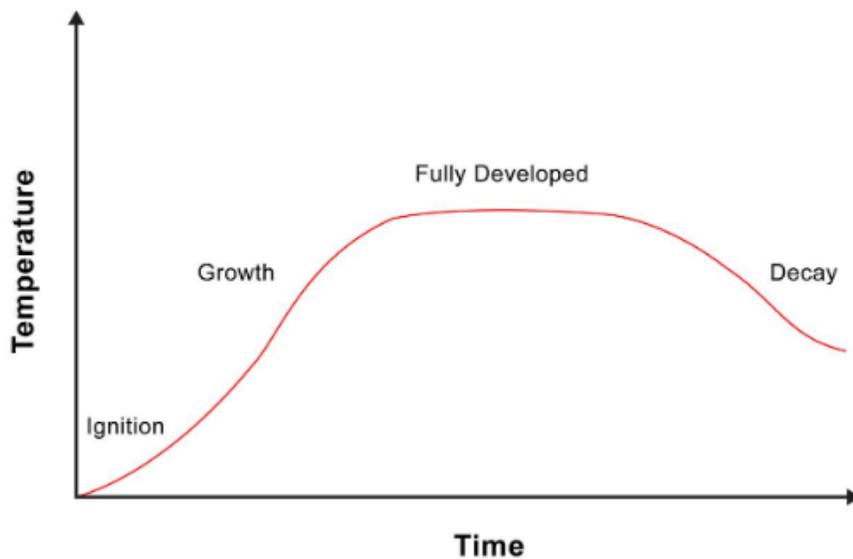


Figura 4: Curva del desarrollo de un incendio en un recinto confinado⁴⁴.

La Figura 4 muestra la curva del desarrollo de un incendio con ventilación limitada. En este caso el incendio se produce en un recinto cerrado sin ventilación. En la fase inicial hay suficiente oxígeno para mezclarse con los gases calientes, lo que resulta en una combustión que genera llamas. A medida que se agota el nivel de oxígeno dentro del recinto, el fuego entra en una fase de decaimiento por falta de ventilación, por lo que la temperatura disminuye. Si se abre un hueco a través del que pueda volver a ventilarse el recinto, el oxígeno se mezcla con los gases calientes y el nivel de energía vuelve a aumentar.

⁴⁴ Fuente: National Institute of Standards and Technology

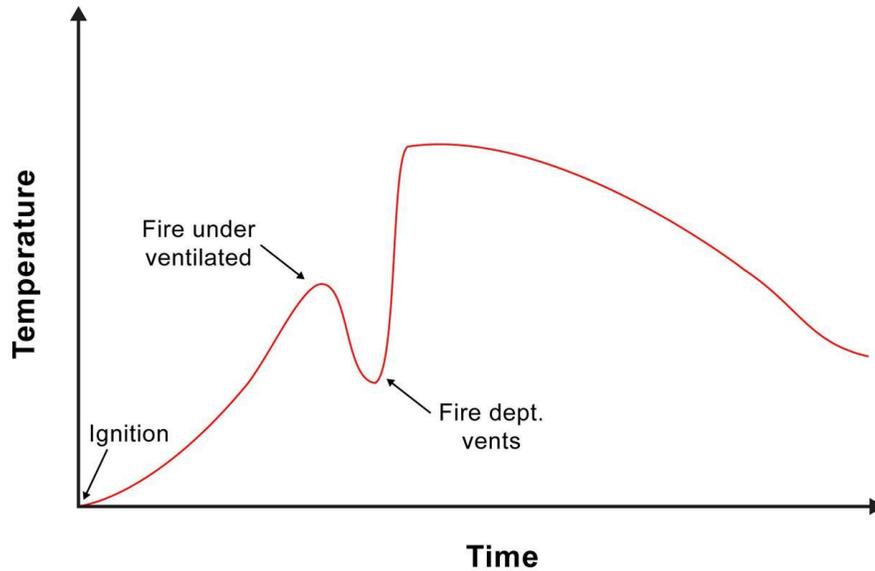


Figura 5: Incendio en un recinto con la ventilación limitada⁴⁵

Fenómenos durante la combustión:

- **Combustión súbita generalizada o flashover:** Es una transición entre la fase de crecimiento y la fase de pleno desarrollo. En esta fase se produce una combustión casi simultánea de todos los materiales produciéndose en un instante determinado un aumento de temperatura que puede llegar a quintuplicarse. En el momento del *flashover*, el desarrollo del fuego contenido en el recinto genera una elevación súbita de la energía en todas las superficies con una temperatura de los gases superior a los 600°C y que pueden superar los 1000°C.

⁴⁵ Fuente: National Institute of Standards and Technology



Figura 6: Combustión súbita generalizada (flashover)⁴⁶

- **Backdraft o explosión de gases de humo con efecto reverso**, es una deflagración en un recinto sin ventilación por enriquecimiento súbito de oxígeno.

La NFPA 921⁴⁷, define al *backdraft* como una explosión de los gases calientes. Se produce cuando la combustión cesa en un recinto por falta de oxígeno que necesitaría para seguir desarrollándose. La combustión cesa en el recinto, pero sigue habiendo gases y humo combustible con temperatura alta. Si se reintroduce oxígeno, por ejemplo, abriendo una puerta del recinto cerrado, la combustión puede reiniciarse de forma súbita dando como resultado una explosión.

⁴⁶ Fuente: Asociación Deportivo Cultural Bomberos de Bilbao

⁴⁷ NFPA 921 Guide for Fire and Explosion Investigations



Figura 7: Explosión de gases con efecto reverso (backdraft)⁴⁸

Ambos fenómenos, backdraft y flashover son en su desarrollo y consecuencias muy similares, pero pueden diferenciarse por distintos parámetros. A continuación, en la Tabla 10 se exponen las diferencias entre ambos conceptos.

⁴⁸ Fuente: Asociación Deportivo Cultural Bomberos de Bilbao

Tabla 10: Diferencias entre flashover y backdraft⁴⁹

Características	Flashover	Backdraft
Fase del incendio	Inicial	Arde sin llama
Espacio	Ventilado	No ventilado
Agente inductor	Temperatura	Ventilación
Generación de energía	Llamas	Brasas
Factores fundamentales	Temperatura de ignición	Energía mínima de ignición
Tipo de llama	Libre de difusión	Llama premezclada
Onda de sobrepresión	No	Frecuentemente
Incendio posterior	Generalizado	No necesariamente

- **Explosión y tipos** [52]: Es la liberación súbita de gas a muy alta presión. La energía liberada se traslada y disipa mediante una onda de choque, onda de presión u onda expansiva.

⁴⁹ Fuente: Asociación Deportivo Cultural Bomberos de Bilbao



Figura 8: Onda expansiva en explosión por un proceso químico⁵⁰.

La explosión se clasifica en función de su origen, ya sea por un proceso químico como el de la Figura 8 o un fenómeno físico como la rotura de un recipiente o evaporación súbita de un líquido.

- **Explosión química.** Tiene su origen en una reacción química, habitualmente por una combustión. Se define como homogénea o uniforme si tiene lugar simultáneamente en toda la sustancia, siendo entonces la velocidad de reacción la misma en todos sus puntos. Si la reacción se inicia en un punto de la sustancia y se propaga a través de esta se denomina heterogénea o reacción de propagación. Dependiendo de las condiciones de propagación se puede definir como *detonación* o *deflagración*. En la detonación, la velocidad de propagación es superior a la del sonido. El frente de onda y la velocidad de reacción avanzan juntos a la misma

⁵⁰ Fuente: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-53659528>

velocidad. En la deflagración, la velocidad es inferior a la velocidad del sonido. El frente de onda de presión se propaga más rápidamente que la velocidad de reacción.

- **Explosión física.** Tiene su origen en un fenómeno físico, sin que se produzcan cambios químicos. Se pueden considerar los siguientes tipos de explosión física.
 - **Liberación de gas comprimido.** En este caso, un equipo o recipiente a presión libera el fluido contenido por rotura.
 - **Evaporación de un líquido al entrar en contacto con una superficie caliente.** En este caso, un líquido entra en contacto con una superficie a una temperatura muy superior a su punto de ebullición, generando una evaporación súbita y expansión del vapor.
- **Bleve (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion).** En este caso, la fase gaseosa normalmente de un gas licuado del petróleo se escapa de un recipiente y arde formando una bola de fuego. Ese hecho provoca que la fase líquida hierva y se expanda hasta aproximadamente 260 veces el volumen del líquido. El recipiente en un momento determinado disminuye la presión hasta llegar al valor de la presión atmosférica, el líquido se vaporiza proporcionalmente por la diferencia de temperatura. Los vapores así generados son susceptibles de poder inflamar y dar lugar al fenómeno Bevele.

Curvas de Tiempo-Temperatura

Las curvas de Tiempo-Temperatura muestran el desarrollo del incendio a través de los cambios en la temperatura.

El DB SI indica que la norma UNE-EN 1991-1-2:2019⁵¹ es la referencia para conocer el denominado fuego de cálculo o desarrollo de fuego específico adoptado a efectos de cálculo, así como el denominado fuego totalmente desarrollado o estado en el que todas las superficies combustibles existentes en un determinado espacio participan en el fuego.

El modelo informático de dinámica de fluidos es un modelo de fuego que permite resolver numéricamente las ecuaciones diferenciales parciales que relacionan a las variables termodinámicas y aerodinámicas de cada punto del sector de incendio considerado

Curva normalizada Tiempo – Temperatura

La curva normalizada tiempo-temperatura está definida en la norma UNE-EN 1991-1-2:2019, pero también en la norma UNE EN 1363-1:2015⁵² cuyo objetivo es la determinación de la resistencia al fuego de los materiales de construcción para valorar el comportamiento frente al fuego. Este ensayo se realiza mediante un horno en el que su temperatura media debe controlar que cumpla la siguiente expresión:

$$\Theta_g = 20 + 345 \log_{10} (8 t + 1)$$

siendo: Θ_g temperatura del gas en el sector [°C]

t tiempo desde la iniciación del incendio [min]

⁵¹ Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-2: Acciones generales. Acciones en estructuras expuestas al fuego.

⁵² Ensayos de resistencia al fuego. Parte 1: Requisitos generales

Curva Tiempo – Temperatura de un incendio natural

El cálculo de la curva en un incendio natural requiere un proceso informático dada su complejidad. En la norma UNE-EN 1991-1-2:2019 se exponen los distintos modelos de fuego natural, que pueden ser simplificados o avanzados.

Los modelos de fuego simplificados se fundamentan en parámetros físicos específicos con un campo de acción limitado, suponiendo una distribución uniforme de la temperatura en función del tiempo, distinguiendo la norma los fuegos de sector y los fuegos localizados.

Los modelos de fuego avanzados deben tener en cuenta aspectos como las propiedades del gas, el intercambio de masa y el intercambio de energía. Dentro de los modelos propuestos por la norma para su cálculo está el modelo informático de dinámica de fluidos que determina la evolución de la temperatura en el sector, en función del tiempo y del espacio.

A continuación, se expone la diferencia entre la curva Tiempo-Temperatura normalizada y la curva Tiempo-Temperatura de un incendio natural.

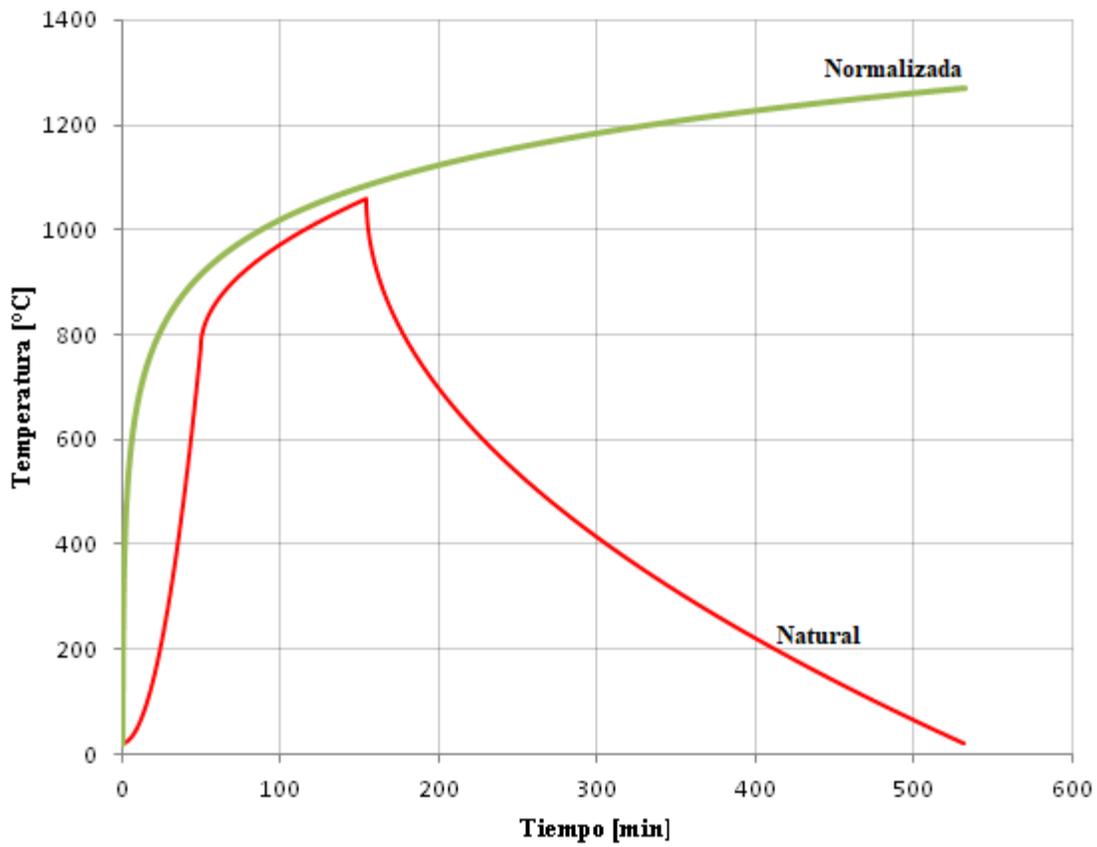


Figura 9: Comparación Curva normalizada y Curva de incendio natural⁵³

⁵³ Cálculos realizados con la aplicación *Parametrische Temperaturzeitkurve nationaler Anhang*

Tabla 11: Temperaturas de la curva normalizada según Figura 9

Tiempo (min)	Temperatura (°C)
0	20
5	576
10	678
15	738
20	781
30	842
45	902
60	945
90	1006
120	1049
150	1082
180	1110
210	1133
240	1153
300	1186
360	1214

Valores de referencia			
Altura media de ventana	h_w	3,00	[m]
Superficie de planta	A_f	400,00	[m ²]
Superficie de pared	A_{wand}	480,00	[m ²]
Área de techo	A_d	400,00	[m ²]
Área de ventana	A_w	96,00	[m ²]
Carga de fuego	q_{fd}	2240,00	[MJ/m ²]

Estructura de la capa			
Pared	ρ in [kg/m ³]	λ in [W/mK]	c in [J/kgK]
Hormigón	2500	1,6	1000
$b_{pared} = 2000,00 \text{ [J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K]}$			

Resultados			
Área de envoltura	A_e	1280,00	[m ²]
Factor de apertura	O	0,13	[m ^{1/2}]
Tasa media de penetración térmica	b	1504,36	[J/m ² s ^{1/2} K]

Techo	ρ in [kg/m ³]	λ in [W/mK]	c in [J/kgK]
Aislamiento del techo	80	0,035	1000
$b_{techo} = 52,92 \text{ [J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K]}$			

Suelo	ρ in [kg/m ³]	λ in [W/mK]	c in [J/kgK]
hormigón	2500	1,6	1000
$b_{suelo} = 2000,00 \text{ [J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K]}$			

Berechnen

t in [min]	min	Θ in [°C]	Q in [MW]
t_1	50,00	775,81	0,00
t_2	94,00	1059,24	264000,00
t_3	146,00	523,87	156000,00

Figura 10: Captura de pantalla del cálculo de la curva de incendio natural⁵⁴

3.3. Comportamiento humano

En la Figura 2 se expone la interacción entre los factores que influyen en el desarrollo de un incendio, entorno, dinámica del incendio y el comportamiento de los usuarios. Tal como se ha ido planteado, el entorno o edificio y la dinámica del incendio están determinados por la normativa que en el caso de edificios es el Código Técnico de la Edificación y la dinámica del incendio es conocida mediante los estudios en física y química, pudiendo actualmente hacerse simulaciones computacionales.

⁵⁴ Cálculo realizado con la aplicación Parametrische Temperaturzeitkurve nationaler Anhang

Estas aplicaciones informáticas realizan simulaciones dinámicas del desarrollo de un incendio dentro de un edificio mediante dos herramientas de libre uso. El motor de cálculo FDS, Fire Dynamics Simulator y el visualizador gráfico Smokeview, SMV, desarrollados por el NIST, National Institute of Standards and Technology, USA. [53]

El campo del comportamiento humano en caso de incendio se diferencia en que es una ciencia bastante novedosa comparada con las otras áreas. Aunque es conocido que los incendios han provocado a lo largo de la historia desastres en los que se han perdido numerosas vidas.

Si bien posteriormente se hará una relación cronológica de los estudios que se han ido desarrollando en esta materia desde principios del siglo XX, las investigaciones en el campo del comportamiento humano en caso de incendio comenzaron de manera más intensa desde finales de los años cincuenta con los trabajos de Bryan [54] en los Estados Unidos. La publicación en 1980 de Fires and Human Behaviour de David Canter [55] presentaba las cuestiones hasta entonces no exploradas en el ámbito del comportamiento. Canter dividía el conocimiento en un modelo de cinco etapas donde se indicaba qué puntos debían investigarse de cada etapa y como conclusión, se argumentaba que la investigación en comportamiento en caso de incendio tenía mucho camino por recorrer, pero también mucho potencial ya que iba a ofrecer un impacto radical en la prevención y la seguridad de las personas en los incendios.

La dificultad para el estudio del comportamiento viene dada en primer lugar por la gran cantidad de variables de comportamiento que interactúan entre sí a lo largo de todo el proceso del incendio. Algunas de estas variables que fueron enumeradas por Proulx [3], no son constantes a lo largo del proceso del incendio e interactúan con otros factores. La otra

dificultad viene dada por la propia naturaleza de los incendios, que pueden definirse como **no previsibles, no habituales y no reproducibles**.

La naturaleza de los incendios hace que la investigación del comportamiento humano mientras éste se desarrolla sea en la práctica imposible y, por tanto, no se pueden obtener datos de la toma de decisiones en tiempo real.

En primer lugar, los incendios son **no previsibles** o difíciles de predecir y por ello actualmente existen sistemas muy sofisticados de detección y alarma. Las causas que originan los incendios se estudian por parte de los expertos, dando como resultado que estas causas son muy diversas y en muchos casos, la causa será de origen desconocido una vez finalizada la investigación.

En la Figura 11, se muestra el origen probable de la causa de los incendios registrados en España durante 2017 con víctimas mortales [1]

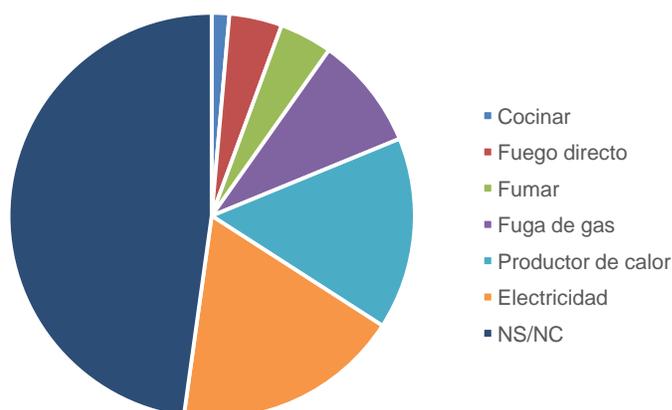


Figura 11. Causa del origen de los incendios con víctimas mortales en 2017.

Los incendios son situaciones **no habituales** y, por tanto, no existe experiencia previa de manera generalizada. La probabilidad de que una persona se vea involucrada en el incendio de un edificio es relativamente baja y por esta razón, cuando se toman las decisiones dentro de ese contexto, puede producirse cierta dificultad para su acceso hasta una zona de seguridad.

Para poder hacer un cálculo de esta probabilidad, se pueden tener en cuenta los datos que aportan los estudios de víctimas de incendios en España con los datos recogidos por la Asociación Profesional de Técnicos de Bomberos y Fundación Mapfre. [1].

En el año 2017, último informe publicado hasta la fecha, los servicios de bomberos en España realizaron un total de 133.339 *intervenciones* relacionadas con incendios, definiéndose como *intervención* la movilización de personal o material para prestar un servicio de extinción de un incendio de asistencia, socorro o rescate a personas, animales o bienes afectados por él.

Según lo publicado en el Instituto Nacional de Estadística, en el año 2017 [56] la población en España era de 46.528.966, lo que supone 2865 intervenciones por cada millón de habitantes. Ese mismo año, el número total de víctimas mortales a causa de un incendio o explosión fueron 212, según se expone en el mismo informe de víctimas de incendios, lo que supone 4,5 víctimas mortales por cada millón de habitantes.

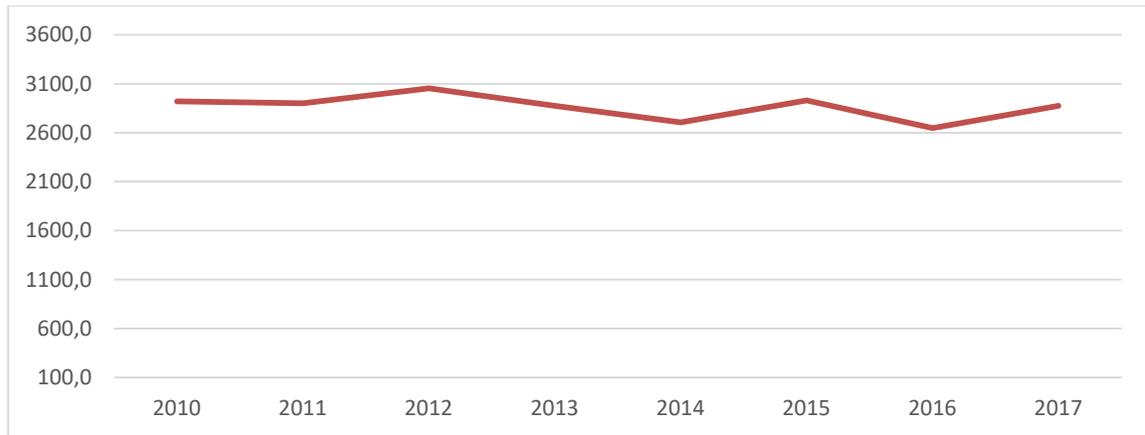


Figura 12. Intervenciones de bomberos en España por cada millón de habitantes.

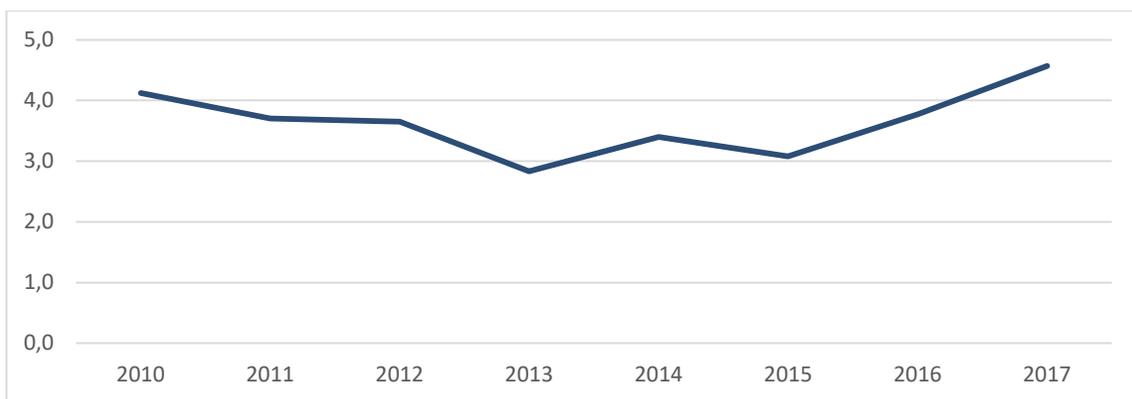


Figura 13. Víctimas mortales en España por cada millón de habitantes.

Con estos datos se puede concluir que la probabilidad de tener experiencia previa en los incendios es baja, y que la dificultad para determinar el origen de un incendio y la gran variedad de causas probables los hacen difíciles de predecir.

El origen accidental de los incendios puede ser por distintas causas, pero es necesario que los equipos de investigación, en muchos casos de ámbito multidisciplinar, puedan determinar cómo se inició.

Los cuerpos de bomberos tienen formación en este ámbito y son los que suelen analizar una primera aproximación a lo ocurrido [57] y en caso de que se detecten indicios de un origen provocado y no accidental, suele ser la policía científica quien informe a las instancias judiciales para que se diriman las responsabilidades correspondientes.

La inspección ocular puede ser suficiente para determinar si el origen ha sido accidental o provocado, así como una valoración de la eficacia de los medios de protección contra incendios. Estos informes preliminares deben ser realizados por expertos en la investigación de incendios y deben ser precisos, minuciosos, inmediatos para evitar que los indicios puedan deteriorarse o incluso desaparecer, objetivos evitando los prejuicios y con unos procedimientos claros.

El informe preliminar debe determinar el origen del fuego, la fuente de ignición, las causas más probables de la citada fuente de ignición y la intencionalidad o no del origen.

El procedimiento para la elaboración del informe del investigador debe observar en primer lugar una recogida de datos que puede ser en forma de entrevistas con las personas afectadas, grabaciones y cualquier otro documento que pueda ser considerado como relevante. Con el análisis de los datos recogidos, el investigador debe plantear una hipótesis sobre lo que ha sucedido, tratar de constatarla y finalmente validar la hipótesis y realizar una reconstrucción global de los hechos.

Para finalizar, investigación debe determinarse si la hipótesis reflejada en el informe es concluyente, por lo que no cabe una segunda posibilidad, probable en el caso de que haya un nivel de certeza muy elevado, pero no llegue a ser concluyente. En caso de no tener información suficiente, se cataloga como desconocida.

Finalizada la investigación, la información que aportan los informes de los investigadores puede ayudar a entender la toma de decisiones de los ocupantes del edificio.

En aquellos casos en los que se concluye que el incendio ha sido accidental y hubo víctimas es recomendable elaborar un anexo al documento con propuesta de medidas con posibles mejoras. Estas mejoras pueden aplicarse al edificio siniestrado si procede y también pueden aplicarse a edificios similares.

Los informes que han realizado los equipos de intervención e investigación ayudan a entender cuáles son los errores cometidos en el diseño de los edificios y sus instalaciones o en los protocolos de evacuación, incluyendo los sistemas de alarma y comunicación. En caso de que el incendio haya tenido una entidad singular debido a sus consecuencias, es posible que deban proponerse adaptación y mejoras en la reglamentación de obligado cumplimiento.

A continuación, se expone una relación de factores que han contribuido al incremento de víctimas en incendios con víctimas y que gracias a los informes posteriores se han podido determinar las medidas para subsanar dichos factores de riesgo.

- **Aforo excesivo**

El aforo de una actividad es una autorización administrativa, regulada por los Ayuntamientos, que no tiene porqué ser equivalente a la ocupación calculada en proyecto para calcular los recorridos y salidas de evacuación.

En el Decreto de 30 de enero de 2014 [58] del Delegado del Área de Gobierno de Seguridad y Emergencias por el que se aprueba la Instrucción sobre la sistematización y racionalización de la normativa y de los criterios aplicables para la determinación del aforo en el término municipal de Madrid se define aforo como el número máximo de personas autorizadas por la Administración a permanecer dentro de un local, recinto o establecimiento durante el desarrollo de la actividad autorizada en su licencia o documento administrativo equivalente.

Un aforo excesivo puede retrasar el flujo de movimiento de las personas durante la evacuación y llegar a bloquear las salidas de emergencia. El caso Madrid Arena en 2012 [59] en el que se excedió el límite del aforo es un ejemplo en el que, aunque sin una causa directa para evacuar el edificio, se pudo constatar que los recorridos de evacuación eran insuficientes para el flujo de personas que había en el interior, lo que provocó finalmente 5 víctimas entre los usuarios.

- **Aviso de alarma inadecuado**

La información que se proporciona a los ocupantes del edificio debe ser efectiva en tiempo y forma. El tiempo que transcurre desde que se detecta el primer indicio del incendio y la comunicación debe ser lo más breve posible, así como la información en forma de señal acústica, visual y/o mensajes.

A continuación, se exponen tres ejemplos que por muy diferentes motivos tuvieron un aviso de alarma no adecuado y por tal motivo agravaron las consecuencias del incidente.

- **Incendio en la empresa de confección Triangle Shirtwaist de Nueva York** [60] en 1911 en el que no hubo aviso a una planta completa de trabajadoras.
- **El incidente en el Italian Hall de Michigan** [61] en 1913 en el que los ocupantes fallecieron por aplastamiento tratando de huir por una falsa alarma de incendio en el edificio.
- **El local Beverly Hills Supper Club de Southgate** [62] no disponía de sistema de alarma.

El sistema de alarma de incendios debe emitir señales acústicas y/o visuales a los ocupantes de un edificio y está regulado por la UNE-EN 54- 1:2011⁵⁵.

Los dispositivos visuales de alarma requeridos según lo indicado en el DB-SI deben cumplir con lo establecido en la norma UNE-EN 54-23:2011⁵⁶. La planificación, diseño, instalación, puesta en servicio, uso y mantenimiento del sistema vienen regulados por la UNE 23007-14:2014⁵⁷.

También es posible aplicar otras guías de reconocido prestigio:

- LPCB. Code of practice for visual alarm devices used for fire warning. BRE.
- Application guideline. Primary visual alarm devices and supplementary indicating devices. Euralarm.

⁵⁵ Sistemas de detección y alarma de incendio

⁵⁶ Sistemas de detección y alarma de incendios. Parte 23: Dispositivos de alarma de incendios. Dispositivos de alarma visual (VAD).

⁵⁷ Sistemas de detección y alarma de incendios. Parte 14: Planificación, diseño, instalación, puesta en servicio, uso y mantenimiento

- Guía de Aplicación de dispositivos visuales de alarma primarios y dispositivos indicadores suplementarios. Euralarm. (Documento traducido del anterior)

- **Elementos de decoración combustible**

Los elementos de decoración combustibles suponen una carga de fuego adicional a los materiales de construcción. En el caso del incendio del Hotel Corona de Aragón [37] [38] de 1979, el incendio se originó en el sótano, pero propagó a gran velocidad alimentado por el mobiliario y los elementos de decoración.

En el conocido como Rhythm Club Fire de Mississipi [63] en 1940, el edificio contaba con una capa de musgo español seco debajo de las vigas del techo que propagó el fuego por toda la cubierta superior.

El incendio del Cocanut Grove de Boston [64] en 1942 también contribuyó de manera decisiva la decoración del local.

Según se establece en el DB SI, en los edificios y establecimientos de Uso Pública Concurrencia, los elementos decorativos y de mobiliario deben cumplir las condiciones de ensayo de las normas⁵⁸ de valoración de la inflamabilidad del mobiliario tapizado y de elementos textiles suspendidos, como telones, cortinas, cortinajes.

- **Salidas insuficientes**

Un número de salidas insuficientes puede tener distintas consecuencias. Por un lado, el flujo de salida puede verse ralentizado e incluso detenido. Por otro, supone que los recorridos

⁵⁸ UNE-EN 1021-1:2015, UNE-EN 1021-2:2015, UNE-EN 13773:2003.

de evacuación pueden tener una longitud excesiva, lo que impide a los ocupantes llegar a una zona de seguridad en un tiempo adecuado.

El incendio del Rhythm Club de Mississippi [63] es un ejemplo de edificio con una única salida, siendo esta insuficiente, donde había más ocupantes de los que dicha salida podía absorber y por otro, el recorrido de evacuación único hasta dicha quedó bloqueado por el fuego.

El número de salidas y los recorridos de evacuación vienen definidos por el número de ocupantes por metro cuadrado o por asiento que tiene un recinto dependiendo de la actividad según el DB SI 3.3⁵⁹. Asimismo, deben realizarse los estudios de evacuación con la hipótesis de bloqueo de alguna de las salidas.

- **Salidas ocultas**

Un diseño o ubicación inadecuados de los elementos de decoración u otro tipo de elementos como expositores de venta pueden ocultar en parte o totalmente las puertas de salida de un edificio e incluso la señalización.

En el incendio del Nightclub de Chicago [65] las salidas de emergencia no eran fácilmente accesibles y la señalización hacia los recorridos de evacuación no funcionaba correctamente.

Para que las salidas sean eficaces deben cumplir con lo establecido en el Anejo A, terminología del DB SI, así como las condiciones impuestas para los recorridos de evacuación.

⁵⁹ Documento Básico de Seguridad en caso de Incendio. Código Técnico de la Edificación.

- **Salidas bloqueadas**

El bloqueo de las salidas de emergencia es un recurso que se utiliza en locales o edificios donde hay un trasiego de personas ajenas a la propia actividad, tales como son los comercios o los locales de hostelería con el fin de evitar robos o el acceso al local evitando el control de la entrada.

Una salida prevista para la evacuación bloqueada en caso de incendio reduce el número de posibilidades en caso de incendio y condiciona las decisiones de los ocupantes al tener que buscar alternativas de salida válidas. El bloqueo de puertas para impedir robos de las prendas de confección condicionó el incendio del Triangle Shirtwaist de Nueva York [60]

- **Apertura de puertas en sentido contrario a la evacuación**

La apertura de puertas en sentido contrario a la evacuación retrasa el flujo de evacuación y ese mismo flujo puede provocar el bloqueo de la puerta. En el incidente del Italian Hall [61] la puerta principal de salida, del edificio tenía apertura contraria a la dirección del flujo de salida provocando el bloqueo al no dar tiempo a los primeros ocupantes en llegar a la puerta a poder abrirla.

La normativa en España establece que las puertas deben abrir en el sentido del recorrido cuando la ocupación prevista sea de más de 200 personas en edificios de uso residencial, más de 100 en edificios de cualquier otro uso y más de 50 de un recinto. Asimismo, los dispositivos de apertura deben ser sencillos y no implicar más de un mecanismo. En el caso de las puertas giratorias manuales se suelen disponer puertas abatibles contiguas a las mismas y las automáticas deben disponer de un sistema de abatimiento en el sentido de evacuación.

La Tabla 12 expone de manera esquemática las conclusiones acerca de qué errores pudieron agravar el número de víctimas mortales de los incendios o incidentes.

Tabla 12 Factores que contribuyen al incremento de víctimas

Incidente	Aforo	Aviso	Decoración	Nº de salidas	Salidas ocultas	Salidas bloqueadas	Apertura puertas
Teatro Iroquois	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Triangle Shirtwaist		✓	✓	✓		✓	✓
Italian Hall		✓		✓			✓
Rhythm Club	✓		✓	✓	✓	✓	✓
Cocoanut Grove	✓		✓		✓	✓	
Ringling Brothers			✓			✓	
Our Lady of Angels		✓	✓	✓		✓	
Hospital Hartford		✓	✓				
Beverly Hills Club	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Corona de Aragón		✓	✓				
Concierto The Who	✓						
MGM Grand		✓	✓		✓	✓	
Discoteca Alcalá 20	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Dupont Plaza		✓	✓	✓		✓	✓
Station Nightclub	✓		✓	✓			

4. Estudio del Comportamiento Humano en caso de Incendio

El principal objetivo de la seguridad en caso de incendio de un edificio es que los ocupantes puedan acceder hasta una zona segura. Como se ha podido comprobar el cumplimiento de manera estricta de la normativa de construcción no es suficiente para garantizar que los ocupantes estén exentos de riesgos derivados del incendio.

El diseño del edificio y las instalaciones de protección contra incendios quedan establecidos en el proyecto de ejecución y por tanto quedan fijados antes de que los usuarios accedan al edificio. En ambos casos la normativa de obligado cumplimiento es la que establece el nivel de seguridad adecuado y la que determina el cumplimiento de las exigencias básicas. En el caso de los protocolos de evacuación, estos deben adaptarse a la actividad y perfil de los ocupantes según se expone en la normativa.

4.1. Antecedentes

A continuación, se expone una revisión bibliográfica relacionada cronológicamente, donde se pone de manifiesto que la investigación en el ámbito del comportamiento humano en caso de incendio tiene su origen en los estudios acerca de las consecuencias que tienen los efectos del fuego, tales como calor o humo en el cuerpo humano y que posteriormente, las investigaciones se fueron centrando en la toma de decisiones de los ocupantes del edificio durante el incendio teniendo en cuenta los efectos derivados del calor o humo y al mismo tiempo las decisiones que se toman por aspectos determinados por el perfil o las relaciones sociales.

Con esta revisión cronológica se puede entender la evolución del conocimiento en el comportamiento humano en caso de incendio que tiene distintas etapas:

- Cómo afectan físicamente los productos del incendio.
- Cómo afecta la comunicación y las relaciones personales.
- Uso de las entrevistas para recoger datos de comportamiento.
- Teorías del comportamiento humano en caso de incendios.
- Modelos y simulaciones informáticas del comportamiento humano.
- Análisis según perfil, sexo, edad o pertenencia a colectivos vulnerables.

1930 *Análisis de la intoxicación por monóxido de carbono* [66].

El monóxido de carbono, CO, es un gas incoloro, no tiene olor y se presenta como consecuencia de la combustión incompleta de carburantes fósiles y de biocombustibles. En el estudio se analiza como el gas penetra en el organismo a través de los pulmones, provocando una disminución de oxígeno en sangre, disfunciones cardiacas, dolor de cabeza, alteraciones en el sistema nervioso, mareos o fatiga. En este estudio se analiza cómo afecta su inhalación en seres vivos.

1931 *Las atmósferas de toxicidad que contienen gas cianuro de hidrógeno* [67]

El cianuro de hidrógeno, o ácido cianhídrico, es un líquido incoloro, muy tóxico y altamente volátil. Puede producirse mediante una reacción con amoníaco y monóxido de carbono. En esta investigación se ponen de manifiesto curvas que relacionan el tiempo de exposición en distintos animales, la concentración de ácido cianhídrico en el aire y la perspectiva de vida.

- 1945 *Los efectos del calor inhalado en los conductos de aire y los pulmones. Una investigación experimental.* [68]

En esta investigación se experimenta con animales y se comprueban las consecuencias de la inhalación de aire calentado por el horno (350°C), la inhalación de la llama y la inhalación de vapor.

- 1951 *Efectos del calor y el frío extremos en la piel humana. II. Temperatura superficial, dolor y conductividad de calor en experimentos con calor radiante.* [69]

Analiza cómo afecta el calor radiante a lo largo del tiempo a la piel humana, así como la influencia de la aplicación de frío preventivo o posterior. También si el calor es un método efectivo como método de aviso y el tiempo que transcurre desde la primera sensación hasta que se inicia el dolor en la piel.

- 1953 *Los productos de la combustión en edificios en llamas* [70]

El estudio analiza la atmósfera en habitaciones alejadas del punto de origen del fuego mostrando que hay varias etapas en el incendio, en la primera la combustión de la madera y otros componentes celulósicos era prácticamente completa y en las etapas posteriores la falta de suministro de oxígeno dio lugar a la aparición de productos de la denominada destilación destructiva o proceso químico de descomposición del material no procesado calentado a muy altas temperaturas, así como a la saturación de humo de la habitación.

- 1953 *Comunicación y Persuasión; Estudios psicológicos de cambio de opinión* [71]

Esta investigación supone una de las primeras aproximaciones al comportamiento de las personas dentro del ámbito social. En esta investigación se expone cómo la

comunicación puede ser un elemento decisivo para modificar la conducta, siempre teniendo en cuenta por un lado el perfil del receptor del mensaje y la capacidad para dejarse influir y por otro la eficacia de los argumentos que conllevan la comunicación. El cambio de conducta mediante la comunicación es una parte esencial en el comportamiento humano en caso de incendio como se podrá comprobar posteriormente.

1954 *Los estudios del NORC sobre el comportamiento humano en los desastres* [72]

En este estudio analiza el comportamiento de las personas en caso de incendio, con miedos intensos en situación de peligro y cómo una comunicación inadecuada puede tener un impacto negativo e incluso peor que no realizar ninguna comunicación.

1957 *Modelos de hombre: Ensayos matemáticos sociales y racionales sobre el comportamiento humano racional en el entorno social* [73]

En este estudio se trató de crear perfiles de comportamiento humano por grupos y/o organizaciones a partir de modelos matemáticos. El estudio del comportamiento individual en caso de incendio puede dar lugar a la agrupación e identificación de distintos perfiles.

1957 *Estudio de los informes de los supervivientes acerca del pánico en el incendio de Arundal Park Hall* [54]

En este estudio se analizó el comportamiento de las personas mediante entrevistas posteriores para tratar de identificar el comportamiento durante el incendio. En la misma época numerosos artículos relataron el comportamiento de pánico de los supervivientes. [74]

- 1960 *Informe Especial de Investigación de Incendios No. 3: Ropa de Protección contra las Llamas y el Calor* [75]

Se analizó cómo el calor afecta a las personas a través del comportamiento que tienen ciertos materiales textiles frente al calor y la llama.

- 1963 *Estrés y trastornos por calor* [43]

En este estudio se analizaba la incapacidad que pueden sufrir las personas cuando se exponen a una fuente de calor intensa. Se expone la medición del estrés térmico ambiental y la evaluación de la tensión fisiológica resultante, donde se consideran los límites térmicos de diferentes tipos de actividad. En este estudio se trata también la termorregulación.

- 1967 *Medidas para hacer frente a los problemas de humo causados por el fuego* [136]

Estudio acerca de cómo afecta el humo a la visibilidad durante la evacuación en caso de incendio.

- 1967 *El humo y los productos tóxicos producidos en los incendios* [76]

Estudio de la toxicidad de los gases producto de la combustión de los plásticos y cómo estos influyen en las personas durante la evacuación.

- 1968 *Inhibición colectiva de la intervención de los ocupantes en las emergencias* [77]

Esta investigación analiza los distintos comportamientos de las personas en caso de incendio dependiendo de si están solos, en compañía de otras personas y cómo influye la actividad o pasividad del grupo en las decisiones.

- 1968 *Familias en Desastres: Reacciones y familiares* [78]

Este estudio examina la conducta de la familia en una situación de emergencia. En este

caso no era un incendio sino el riesgo de inundación. La conclusión del estudio en este caso era que las familias no consideraron la amenaza a pesar de las distintas advertencias que recibieron.

1970 *El transeúnte que no responde: ¿Por qué no ayuda?* [77]

Este estudio analiza qué variables de comportamiento determinan si son detonantes para que un individuo que está ante una emergencia como un accidente o un incendio pueda o no actuar.

1975 *Comportamiento de pánico: Algunas observaciones empíricas* [14]

Este estudio describe los hallazgos generales sobre el comportamiento de pánico. Se hace un análisis acerca de qué conductas son realmente pánico en contraste con los conceptos erróneos asumidos. También se analiza la frecuencia con la que aparece el pánico y qué factores de contexto facilitan su aparición.

1978 *Planificar el flujo de tráfico peatonal en los edificios* [79]

Se analiza la planificación mediante un simulador el flujo de movimientos de las personas dentro de un edificio. De esta manera se podían realizar los primeros análisis de incendios reales.

1978 *Tragedia en Kentucky* [80]

Análisis en base a testimonios del comportamiento y la toma de decisiones en un incendio.

1979 *Comportamiento humano en el incendio del Beberly Hills* [81]

Análisis en base a testimonios del comportamiento y la toma de decisiones en un incendio.

- 1979 *La toma de decisiones; un análisis psicológico del conflicto, la elección y el compromiso* [82]

En este estudio se propone una teoría descriptiva general de la toma de decisiones. Esta teoría incluye conductas en las que el ocupante afronta, vigila, huye o tiene una actitud defensiva frente a una situación de riesgo. Los resultados del análisis de conducta de las personas se obtienen en este estudio mediante debates entre expertos y por el método del caso, es decir estudio de un evento concreto a través del cual se pueden descubrir errores y mejorar, en general, el conocimiento en ese campo.

- 1980 *Evacuación del edificio: Hallazgos de la investigación y recomendaciones en incendios y comportamiento humano* [83]

En este estudio se hace una recopilación de los hallazgos que se han ido haciendo hasta la fecha. Estos hallazgos pasan a ser recomendaciones de mejora del diseño de los edificios como, por ejemplo, el cálculo de ancho de las puertas de salida.

- 1981 *Gestión, Planificación de Evacuación en Emergencia* [84]

Este libro se propone soluciones y mejoras para el diseño de planificación de las emergencias, teniendo en cuenta el comportamiento de los ocupantes.

- 1990 *Alarmas para personas con discapacidad auditiva* [15]

Este estudio analiza la personalización de los sistemas de aviso de alarma de incendio para colectivos vulnerables como las personas con discapacidad sensorial.

- 1991 *Sistemas de información para alerta de incendios* [85]

Este estudio incide en la idea que el éxito de la evacuación de un edificio depende de la detección temprana del incendio, así como de una comunicación convincente.

Así mismo se hace un análisis de las investigaciones ya realizadas hasta la fecha acerca de cómo pueden ayudar los sistemas informáticos en la alerta temprana de los incendios.

- 1993 *Un análisis de la demora en la respuesta del personal a las señales de alarma de incendios en los centros de atención de salud* [16]

Este estudio expone un trabajo acerca del tiempo que transcurre desde que suena una señal de alarma hasta que el receptor de la señal toma conciencia de que debe desplazarse a zona segura en el caso particular de los centros sanitarios.

- 1995 *Teoría y Metodología: Verificación y validación de modelos de simulación* [86]

En este documento se estudia la verificación y validación de los modelos de simulación y para ello se realiza una comparación entre los datos reales obtenidos y a los que se ha llegado a través de los simuladores.

- 1996 *Impacto de la interacción social en el tiempo de inicio de la evacuación en los incendios de edificios de oficinas: Implicaciones para modelar el comportamiento* [87]

En este estudio se analiza la fase de pre evacuación en edificio de uso administrativo para crear modelos en simuladores computacionales. En este sentido se suceden en estos años numerosos estudios en este ámbito, 1997 [88], 1997 [89], 1998 [90], 1999 [91], 1999 [92], 2001 [93].

- 2001 *Comportamiento de los ocupantes y evacuación* [3]

Se analizan los parámetros que afectan a las decisiones durante una evacuación por incendio, incluyendo variables como las características del edificio, el perfil del ocupante y el desarrollo del incendio.

2001 *El tamaño del grupo primario y el riesgo de mortalidad en un desastre de incendio* [94]

En el ámbito de las relaciones de grupo este estudio analizó las decisiones individuales que se toman en caso de emergencia influidos por otras personas.

2001 *Diferencias de género en la respuesta a los incendios* [95]

Las diferencias de comportamiento según perfiles estudian, clasifican y predicen las decisiones que puede tomar un individuo durante un incendio. En este estudio se establecen diferencias claras de comportamiento dependiendo del sexo, siendo en conclusión las mujeres más protectoras con las personas de su entorno y los hombres más dispuestos a la lucha contra el incendio.

2001 *Un enfoque cualitativo para los niños de los países en desarrollo del comportamiento humano en el aspecto del fuego* [17]

En este estudio se analiza el comportamiento de niños en países de desarrollo, por lo que se incluye como perfil un colectivo vulnerable.

4.2. Metodología

Con el objetivo de analizar el comportamiento humano en caso de incendio es necesario establecer un modelo conceptual. Este modelo propuesto por Gwynne, Kuligowski y Kinsey [96] se basa en un marco teórico de la toma de decisiones y la respuesta de cada individuo al contexto de la emergencia.

Para obtener los datos, éstos se recogen a través de todo tipo de informes de distintos organismos contrastados donde se hace una relación de los acontecimientos y consecuencias del incendio, observaciones dentro del ámbito de la evacuación de personas y, en definitiva, testimonios o declaraciones de los testigos que describen el comportamiento de las personas [97].

Tal como se ha visto anteriormente, el diseño de los edificios y, por tanto, los elementos para reducir el riesgo de los ocupantes en caso de incendio tales como los recorridos de evacuación o las salidas deben cumplir con unas exigencias básicas. La norma a través de sus documentos básicos permite conocer si el diseño de estos elementos cumple con las exigencias básicas.

Pero debe tenerse en cuenta que además del cumplimiento del código de edificación, dependiendo de las actividades es posible que sea obligatorio un plan de emergencias o un plan de autoprotección que contemple los procedimientos de evacuación del edificio en caso de incendio.

Un método [98] para evaluar la idoneidad del procedimiento de evacuación es comprobar el intervalo de tiempo que necesitan los ocupantes de un edificio para acceder a un lugar seguro.

Estos modelos de obtención de tiempos son muy simples y se basan únicamente en la suma de los tiempos estimados en distintas fases del proceso de la evacuación.

La simplificación viene dada porque esta estimación no tiene en cuenta el comportamiento individual de cada persona dependiendo de numerosas variables que interaccionan entre sí.

En realidad, con lo expuesto hasta ahora se puede determinar que cualquier modelo que trate de cuantificar en tiempo la evacuación de las personas durante un incendio es una simplificación, ya que implica una estimación teórica con datos a partir de cuestionarios, informes o entrevistas y no de datos recogidos in situ en tiempo real durante el incendio, independientemente del enfoque adoptado.

Los actuales modelos de comportamiento, por tanto, son en realidad una composición de datos obtenidos de diversas maneras que generan teorías con el objetivo de representar en parte la toma de decisiones de los ocupantes que evacuan el edificio [99].

Estos modelos después se trasladan a simuladores [100], [101], [102] en los que se designan los comportamientos a distintos perfiles de los avatares. Estos simuladores ofrecen una información adicional, sobre todo en lo que respecta al movimiento de las personas y en especial, a los puntos críticos donde pueden darse embotellamientos o una ralentización debido al cruce de sentidos del movimiento, aunque muchas de las decisiones de programación queden al arbitrio del técnico que realiza la simulación.

Actualmente, no existe ningún modelo [96] que sea lo suficientemente preciso para reflejar la realidad del comportamiento humano en caso de incendio, aunque es cierto que se han hecho ciertos avances gracias a las numerosas investigaciones que se vienen realizando en todos los campos relacionados.

Para poder enfocar el objetivo de esta tesis, se plantean dos conceptos que van a servir como base del análisis del comportamiento: el tiempo y los indicios.

4.2.1. El tiempo

Desde que se inicia un incendio no controlado en un edificio existen toda una gama de sistemas que detectan, dan aviso y controlan la propagación o directamente consiguen sofocar el fuego. Estos sistemas normalmente actúan de manera automática y ya estaban previstos, independientemente del incendio que se produzca.

Los planes de emergencia coexisten y complementan la seguridad que proporcionan los anteriores sistemas con el principal objetivo de que todos los ocupantes del edificio puedan acceder a una zona segura sin daños.

Para ello la clave es el tiempo que se destina desde que cualquier ocupante recibe la primera notificación de alarma hasta que puede acceder a la zona de seguridad, tiempo que en este estudio se denomina Tiempo de evacuación.

Este Tiempo de evacuación es posible dividirlo en fases para poder determinar con mayor precisión qué ocurre en cada una de ellas y qué factores pueden influir. Conocidos los factores que pueden influir en una dilación del tiempo, es posible disponer los medios adecuados para que dicha dilación no sea significativa [103].



Figura 14: Desarrollo de la emergencia - tiempo. Punto de intervención⁶⁰

En la Figura 14, se expone cómo el desarrollo de la emergencia crece de manera exponencial a lo largo del tiempo, por lo que las primeras acciones que se adoptan deben consumir el menor tiempo posible para que la evacuación tenga éxito. Dada la importancia del concepto tiempo como factor decisivo en la evacuación de las personas, es preciso crear una línea temporal que abarque cada una de las distintas fases que se producen desde el origen del fuego hasta la finalización.

Las Notas Técnicas de Prevención o NTP son guías de buenas prácticas publicadas por el Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo. Estas guías no son de obligado cumplimiento, salvo que estén recogidas en una disposición normativa vigente. El caso de la NTP 436 [98] trata el cálculo estimativo de vías y tiempos de evacuación.

En esta NTP 436 se indica que “el desalojo por incendio o emergencia en un local o edificio se pueden considerar cuatro tiempos diferenciados de la evacuación, el tiempo de

⁶⁰ Fuente: NTP 45 Plan de Emergencia contra Incendios

detección t_D , el de alarma t_A , el de retardo t_R y el tiempo propio de evacuación t_{PE} ,” Siendo t_E el tiempo total de evacuación, se puede afirmar que $t_E = t_D + t_A + t_B + t_{PE}$

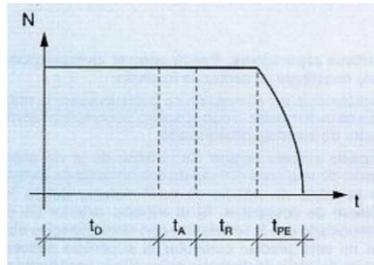


Figura 15. Tiempo estimado para la evacuación⁶¹

El tiempo es la medida básica utilizada en la ingeniería para determinar si un espacio y una actividad tienen un nivel aceptable de riesgo para las personas.

Para esta investigación las fases que se tendrán en cuenta se definirán de la siguiente forma:

- **Tiempo de detección:** Intervalo que transcurre desde el instante inicial de la ignición del incendio hasta que es localizado por un sistema de detección automático o por una persona.
- **Tiempo de advertencia:** Intervalo que transcurre desde la detección del incendio hasta el inicio de aviso de alarma.

Cuando la detección se realiza mediante un sistema automático, este intervalo puede ser muy breve o casi nulo. En el caso en el que la detección sea por parte de una persona, este

⁶¹ Fuente: NTP 436

intervalo tiene una demora hasta que se toma la decisión de iniciar la señal de alarma mediante un pulsador manual u otros métodos.

- **Tiempo de reconocimiento:** Intervalo que transcurre desde el inicio de la señal de alarma hasta que el usuario interpreta que hay una emergencia real o amenaza.
- **Tiempo de respuesta:** Intervalo que transcurre desde el *tiempo de reconocimiento*, es decir cuando el usuario interpreta que existe una amenaza hasta el inicio del traslado para evacuar el edificio.
- **Tiempo de desplazamiento:** Intervalo que transcurre desde el inicio del traslado de los ocupantes hasta acceder a una zona de seguridad, siendo zona de seguridad la zona en la que se puede dar por finalizada la evacuación de los ocupantes del edificio.

La zona de seguridad puede ser un espacio exterior seguro, una zona de refugio o un sector de incendio alternativo⁶².

- **Tiempo de pre-evacuación:** Intervalo que transcurre desde el inicio de *tiempo de reconocimiento* hasta la finalización del *tiempo de respuesta*.
- **Tiempo de evacuación:** Intervalo que transcurre desde el inicio del *tiempo de reconocimiento* hasta que finaliza con el acceso de los ocupantes a una zona de seguridad.
- **Tiempo disponible seguro:** Intervalo de tiempo desde la señal de alarma hasta el *tiempo límite* a partir del cual la evacuación de los ocupantes se hace inviable.
- **Tiempo límite:** Es el instante a partir del cual la evacuación de las personas se hace inviable por las condiciones del entorno a causa del desarrollo del incendio.

⁶² Los términos espacio exterior seguro, zona de refugio y sector de incendio alternativo se definen en el DB-SI.

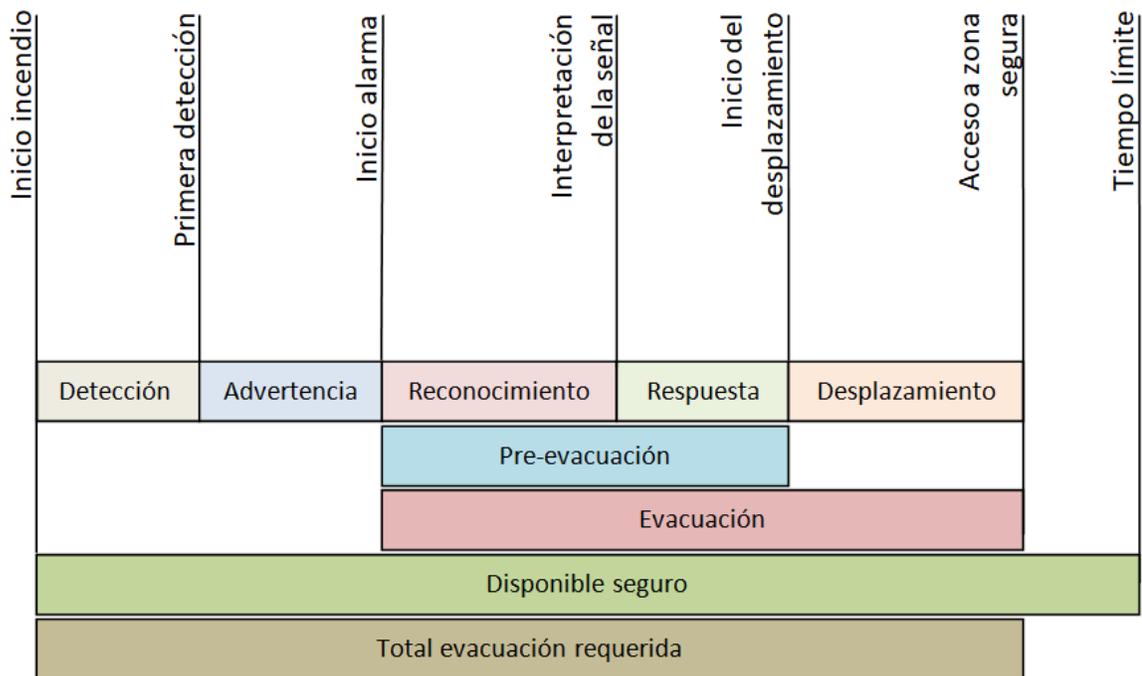


Figura 16: Línea temporal del proceso de evacuación

La Figura 16 representa en una línea temporal los intervalos o fases.

La división en fases permite un análisis más detallado del comportamiento de las personas en cada una de ellas debido a que la toma de decisiones puede variar debido a diferentes circunstancias que se van sucediendo a lo largo del desarrollo del incendio [104].

La idea de modelo de subdivisión por fases se ha tomado de las investigaciones realizadas por Purser y Bensylum [90]. quienes exponen que el comportamiento de los ocupantes en caso de incendio depende de las interacciones entre edificio, dinámica del incendio y el comportamiento humano y como conclusión de la división de fases propuesta, los tiempos estimados para la fase de traslado o Tiempo de desplazamiento disponen de

modelos de cálculo razonables, pero es así en el que se ha denominado Tiempo de pre-evacuación al que califican como mal descrito y cuantificado.

Para poder realizar una estimación fiable del Tiempo de evacuación, que engloba el Tiempo de pre-evacuación y el Tiempo de desplazamiento es necesario un profundo conocimiento del comportamiento humano y las decisiones que se toman durante las emergencias de incendios. En la actualidad hay disponibles diferentes modelos de evacuación y de software de simulación para realizar esta estimación [105], pero tal como se ha expuesto también anteriormente, estos modelos se basan en supuestos simplificados que no pueden acceder a datos registrados in situ en tiempo real y, por tanto, en realidad son las conclusiones de análisis de datos obtenidos de manera indirecta. [106]. Por lo tanto, se necesitan más estudios de recopilación de datos para reducir la incertidumbre asociada a los modelos de evacuación existentes. [104].

Durante toda la línea temporal que representa el incendio, la persona recibe distintos indicios, considerando como indicio todo fenómeno que permite inferir la existencia de otro no percibido. La percepción de indicios, dado que se van generando a lo largo del desarrollo del incendio, genera un proceso iterativo [3] en la que el individuo debe interpretar las señales que recibe, tomar decisiones en referencia a cada una de ellas y poner en marcha la acción correspondiente.

En la fase que antecede al desplazamiento o Tiempo de pre-evacuación, las señales o indicios que recibe el individuo le deben conducir como conclusión al inicio del desplazamiento. Así, el individuo puede percibir como indicio una señal sonora de alarma que infiere la presencia en el edificio de un incendio. Otros indicios similares pueden ser el aviso

de otra persona, percibir olor a humo, el sonido de la combustión de las llamas e incluso la visualización del propio fuego. Estos indicios que pueden indicar la presencia de un incendio no tienen por qué dar lugar al inicio del desplazamiento hasta una zona de seguridad [90].

El usuario en primera instancia puede tomar como decisión investigar para recibir más información acerca de lo que está sucediendo para conocer si la amenaza es suficiente para obligarle a desplazarse o bien para conocer todas las alternativas posibles antes de tomar la decisión de desplazamiento. Si la decisión final de iniciar el desplazamiento se demora, esto puede repercutir en el nivel de riesgo que puede sufrir la persona.

Cuando el usuario toma la decisión de iniciar el desplazamiento, debe seleccionar recorrido de evacuación y salida. Este Tiempo de desplazamiento puede demorarse debido a los cambios que pueden ir surgiendo a lo largo del recorrido de evacuación y del desarrollo del incendio, como el bloqueo de la salida elegida o la inhabilitación de una ruta debido al humo.

Todas las decisiones que toma el ocupante pueden tener influencia debida a factores ambientales internos, como puede ser la percepción individual del riesgo [107] o a factores ambientales externos como la influencia del grupo [108] que a su vez tienen una incidencia en la suma de las intervalos de tiempos que componen el Tiempo de evacuación.

4.3. Los indicios

Indicio según la RAE⁶³ es un “fenómeno que permite conocer o inferir la existencia de otro no percibido”, para este estudio, indicio es circunstancia que, en conjunción con otras, permite deducir razonadamente que se ha producido un determinado hecho.

Un único indicio puede ser o no concluyente. En caso de no ser concluyente para la persona que lo percibe, puede darse la necesidad de buscar más información hasta llegar a una conclusión [90].

Entorno: Señales proporcionadas por el edificio y sus instalaciones

Las señales acústicas de los dispositivos de alarma son uno de los indicios más evidentes. También puede ser indicios la iluminación de una sala de cine en mitad de una proyección o por el contrario, un apagón en un edificio iluminado. Otro indicio en este sentido puede ser cuando se interrumpe la música en una sala de baile o el sonido de una sirena de un camión de bomberos. Todos estos indicios requieren la atención del ocupante del edificio.

En el caso de una infraestructura como un túnel por donde circulan vehículos particulares, se puede recibir información a través de la radio, según se expone en el Real Decreto 635/2006⁶⁴. Se debe indicar a los usuarios antes de la entrada al túnel, mediante los signos adecuados, cómo se puede recibir esta información. En este caso el

⁶³ Real Academia Española

⁶⁴ Real Decreto 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado

indicio es la inclusión de un mensaje de advertencia a través de las emisoras de radio de los vehículos.

Los dispositivos como los sistemas de alarma que proporcionan indicios en un edificio deben tener en cuenta a colectivos vulnerables como son las personas con discapacidad sensorial como son los dispositivos visuales de alarma⁶⁵.

- **Incendio:** Señales percibidas producto del incendio

Los indicios producto del incendio afectan a todos los sentidos [3]. El aumento de calor generalizado o el aumento de la temperatura de elementos afectados por el incendio como tabiques interiores o puertas. La visualización del humo y sus productos en suspensión o el olor del humo. La visualización de la luz directa o indirecta de las llamas. El sonido de los elementos que arden como combustible dando lugar a agrietamientos, rotura de cristales o caída de objetos.

- **Comportamiento:** Señales proporcionadas por otras personas.

El movimiento no habitual de un grupo de personas o por el contrario, la inacción de un grupo de personas son indicios. También son indicios las instrucciones verbales o el sonido de las sirenas de los vehículos de bomberos.

Indicios de diferente tipo y del mismo hecho pueden informar a personas en distintos puntos del edificio.

⁶⁵ DB-SI 4. Dotación de instalaciones de protección contra incendios.

Un incendio originado en un punto del edificio puede ser avistado por una persona y la señal de alarma provocada por la detección del calor o el humo puede ser la advertencia o el indicio para otra persona distanciada de dicho punto de origen.

En el informe realizado por el NIST⁶⁶ [109] tras el ataque terrorista del World Trade Center (WTC) en 2001 donde se analiza el comportamiento de los ocupantes y cómo se realizó la evacuación, se llegó a la conclusión de que los indicios eran de muy diversos tipos y que estos evolucionaban a lo largo del tiempo.

La encuesta recopilada en dicho informe fue proporcionada por los propios ocupantes que sobrevivieron acerca de cómo percibieron y fueron conscientes del hecho. La colisión del primer avión cuya explosión atravesó el edificio fue un indicio obvio e inmediato para aquellos que vieron el impacto, aunque algunas de las llamadas recogidas por emergencias relataban la explosión de un artefacto.

Cada una de las dos torres del WTC contaba con 110 plantas de uso mayoritariamente administrativo, excepto 8 plantas destinadas a servicios técnicos. (7 y 8, 41 y 42, 75 y 76 y 108 y 109). En la tabla 14 se expone el porcentaje de supervivientes que fue consciente del impacto dependiendo de la planta en la que se encontraba.

⁶⁶ National Institute of Standards and Technology

Tabla 13: Porcentaje de supervivientes en el WTC1 que sintieron el impacto del avión

Ocupantes de WTC1	Sintieron el impacto
Total, WTC1 (102 plantas)	63%
Tercio superior (por encima de la planta 78)	60%
Tercio medio (Plantas 44 a 77)	62%
Tercio inferior (hasta la planta 43)	64%

Tras el primer indicio que supuso el impacto del avión, se suceden nuevos indicios percibidos a través de los sentidos por los supervivientes que corresponden con daños materiales que se van produciendo en el edificio.

A continuación, se expone en una tabla el porcentaje de ocupantes que percibieron estos nuevos indicios. El total del porcentaje no suma 100 dado que hay ocupantes que observaron más de un indicio.

Tabla 14: Indicios percibidos por supervivientes en el WTC1 posteriores al impacto

Indicios	Porcentaje
Caída de placas del techo	17 %
Corte de energía/ luces parpadeantes	17%
Humo	10%
Combustible de avión	8%
Alarma de incendios	8%
Caída de paramentos	6%
Otros indicios, incluido fuego, personas heridas, rociadores, calor extremo, escombros	45%

A modo de resumen, los indicios pueden ser percibidos de muy diversas maneras por un mismo hecho y a través de distintos sentidos como el olor, la vista, el sonido.

En caso de incendio, en algún momento los ocupantes deberían sentir a través de cualquiera de los cinco sentidos, indicios del fuego. Sin embargo, es importante comprender que la percepción de las señales puede no ocurrir inmediatamente después de la ignición, y en algunos casos, puede no ocurrir en absoluto, lo que retrasaría considerablemente el proceso de toma de decisiones. Con cada uno de los sentidos, los ocupantes pueden percibir las señales de su entorno: oído, vista, tacto, olfato o gusto.

Los indicios relacionados con el fuego y la combustión pueden recibirse a través de uno o varios sentidos. Las señales olfativas que aparecen en el incendio son olores del humo, de la madera, del plástico o del acrílico entre otros. La detección del humo a través del olfato es uno

de los más comunes que se han estudiado [110]. Entre las conclusiones de estos estudios se puede destacar que las mujeres son más sensibles al olor del humo y que el tiempo necesario para que una persona perciba el olor a humo es muy dilatado.

En el caso del olor, es un estímulo que no suele despertar en caso de incendio que afecte a personas dormidas. En un estudio sobre la eficacia del olor a humo como estímulo a ocupantes dormidos, sólo el 20% de los sujetos examinados llegaron a despertarse por olor a humo [111].

En el caso del WTC, los indicios se percibieron a través de los sentidos con la siguiente distribución resumen de la Tabla 15 [109]

Tabla 15: Indicios percibidos por supervivientes en el WTC1 por sentidos

Indicios	Porcentaje
Sentir algo. (Movimiento, impacto, vibración, sacudida)	63%
Escuchar algo. (Explosión, crujido, retumbe, choque, golpe)	30%
Otros indicios. (Ver el avión, olor a queroseno, caídas, avisos)	7%

4.4. La comunicación

La comunicación a los ocupantes en caso de incendio en un edificio es el conjunto de medios que se pueden disponer para advertir e informar a las personas de un riesgo y en su caso cómo afrontarlo. La comunicación puede ser sonora mediante señales de alarma acústicas

o mensajes de voz por megafonía o personas. La comunicación visual puede ser mediante la señalización de emergencia.

A continuación, se exponen con mayor detalle los distintos medios para comunicar a los ocupantes la información necesaria para evacuar el edificio.

Según el DB-SI, el sistema de alarma de incendios es el que permite emitir señales acústicas y/o visuales a los ocupantes de un edificio.

La finalidad de un dispositivo acústico de alarma de incendios según la norma europea UNE⁶⁷, es alertar a las personas dentro o en las proximidades de un edificio de una emergencia de incendios con el fin de permitir a dichas personas tomar las medidas apropiadas. En la misma norma se regulan los requisitos del sonido tales como intervalo de frecuencias, patrón temporal y nivel de salida.

En ciertos países de Europa se utilizan patrones y frecuencias de sonido específicos. En la Tabla 16 se hace referencia a algunos de ellos.

⁶⁷ UNE-EN 54-3:2016+A1:2019 S Sistemas de detección y alarma de incendios. Parte 3: Dispositivos de alarma de incendios. Dispositivos acústico

Tabla 16: Patrones de sonido de alarma utilizados en algunos países europeos

Referencia	Título	País
ISO 8201	Acústica. Señal de evacuación de emergencia audible	Norma internacional
DIN 33404-3	Señales de peligro para lugares de trabajo; señales de peligro auditivas; señal de emergencia unificada; requisitos técnicos de seguridad, ensayos.	Alemania
BS 5839-1	Sistemas de detección de incendios y de alarma de incendios para edificios. Código de práctica para diseño, instalación, puesta en marcha y mantenimiento del sistema.	Reino Unido
NF S32-001	Señal de evacuación de emergencia audible	Francia
NEN 2575	Seguridad contra incendios de edificios. Instalaciones de alarma de evacuación. Requisitos de sistema y calidad y guías para situar dispositivos de alarma	Países Bajos

A continuación, se muestran los gráficos de los patrones indicados en la Tabla 16

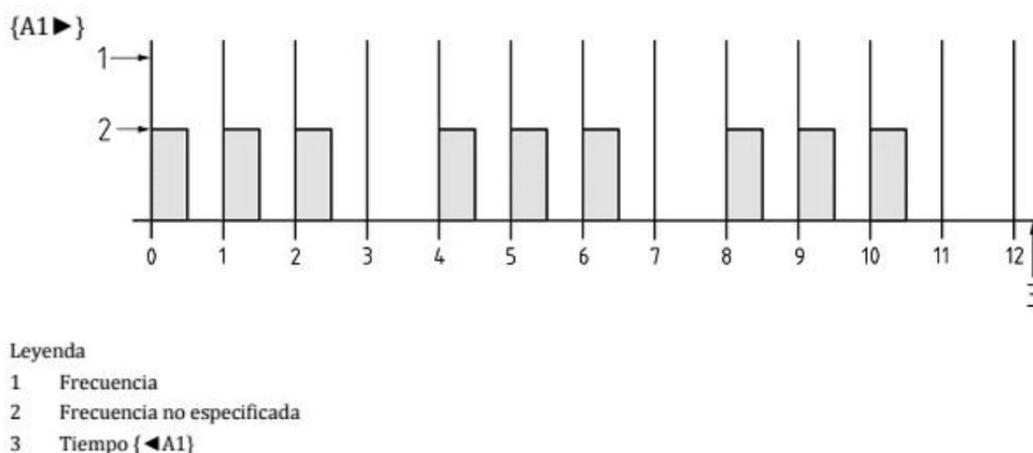


Figura 17: Norma ISO 8201 Señal de evacuación

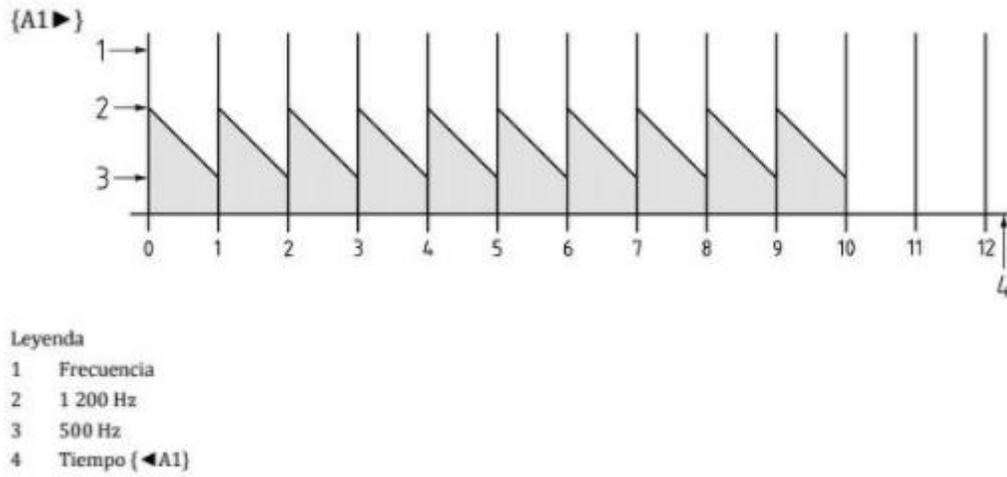


Figura 18. Norma DIN33404-3 Señal de emergencia unificada

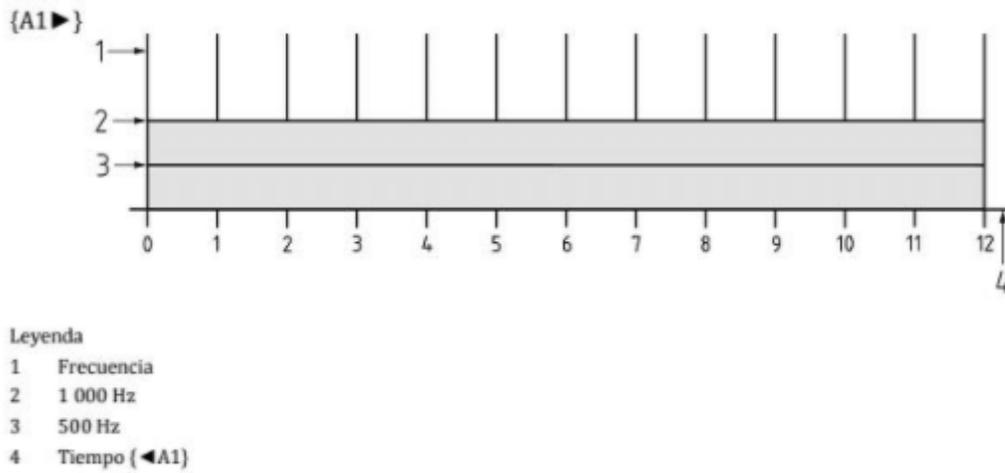
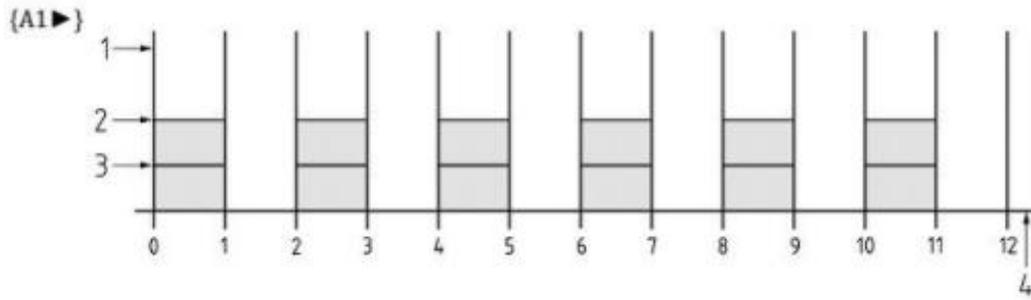
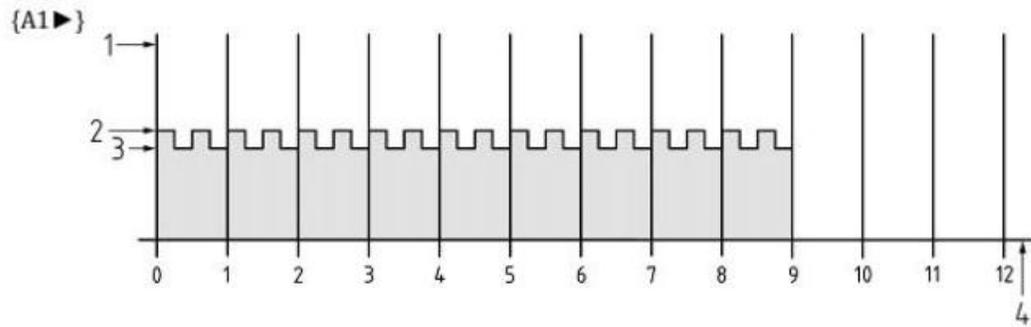


Figura 19: Norma BS 5839-1 Señal de evacuación



- Leyenda
- 1 Frecuencia
 - 2 1 000 Hz
 - 3 500 Hz
 - 4 Tiempo (◀A1)

Figura 20: Norma BS 5839-1 Señal de alerta



- Leyenda
- 1 Frecuencia
 - 2 554 Hz
 - 3 440 Hz
 - 4 Tiempo (◀A1)

Figura 21: Norma NF S32-001 Señal de evacuación

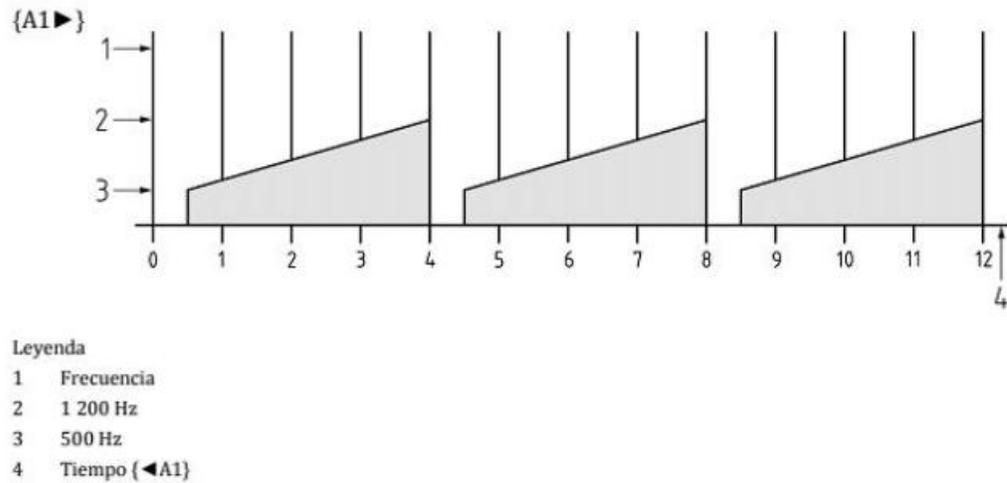


Figura 22: Norma NEN 2575 Señal de evacuación

La Norma ISO 8201:2017⁶⁸ indica los requisitos para que la señal sea audible y se identifique sin ninguna duda como señal de evacuación o de emergencia para aquellas personas que se encuentren dentro de su radio de acción. Las emergencias pueden ser incendio, fugas de gas, explosión, radiación nuclear u otras similares que precisen una evacuación inmediata.

Además, se definen dos parámetros acústicos: el patrón temporal y el nivel de presión acústica requerido dependiendo del lugar dentro del radio de acción previsto.

⁶⁸ ISO 8201:2017. Alarm systems. Audible emergency evacuation signal. Requirements

Las alarmas vocales⁶⁹ o con mensajes de voz son otro instrumento para alertar a los ocupantes de un edificio. Utilizan una combinación de señales acústicas y mensajes de advertencia e información.

La comunicación es la base para que la fase de pre-evacuación tenga la menor demora posible, evitando que el usuario del edificio dedique tiempo a explorar, indagar o meditar acerca de las decisiones que debe tomar. Una comunicación incorrecta, incompleta o tardía conlleva un intervalo mayor en la pre-evacuación.

La comunicación mediante una señal de alarma puede no ser indicio suficiente para el inicio del desplazamiento. La percepción de la señal de alarma se ha investigado en diferentes ámbitos [15], [16], [18], [112], [113].

Para que la comunicación sea eficaz, el usuario debe percibir a través de la señal la amenaza como real, anteponiéndose a su percepción del riesgo.

La percepción del riesgo es la capacidad de detectar, identificar y reaccionar de manera adecuada ante una situación en la que el individuo o bien otros individuos pueden sufrir un daño. Protección Civil [114] define riesgo como la combinación de la probabilidad de que se desencadene un determinado fenómeno o suceso que, como consecuencia de su propia naturaleza o intensidad y la vulnerabilidad de los elementos expuestos, puede producir efectos perjudiciales en las personas o pérdidas de bienes. En definitiva, es una condición que genera la posibilidad de que las personas puedan sufrir daños.

⁶⁹ UNE-EN 54-3:2016+A1:2019. Sistemas de detección y alarma de incendios. Parte 3: Dispositivos de alarma de incendios. Dispositivos acústico

La percepción del riesgo es una característica personal que, en el caso de los incendios puede estar desvirtuada. La información que las personas, en general, tienen de los incendios o lo que imaginan debe ser el desarrollo de un incendio por falta de experiencia previa lleva al individuo a no ser consciente de los riesgos reales.

Las suposiciones de comportamiento [115] como puede ser la reacción a las señales de alarma no suelen estar explícitamente establecidas en los códigos de construcción o en los reglamentos de protección contra incendios. Sin embargo, asumen conductas en caso de incendio. Por ello, los redactores de los proyectos técnicos de protección contra incendios deben interpretar y prever las decisiones que van a tomar los usuarios de los edificios que han diseñado.

Como se ha expuesto anteriormente, las señales de alarma son indicios que el usuario debe interpretar como una amenaza dentro del edificio en el que se encuentra.

Proulx [116] expone que el ocupante requiere prestar atención al indicio para comparar el sonido o mensaje de la señal con su conocimiento previo en emergencias, experiencias o entrenamiento en simulacros.

No es necesario que una persona haya pasado por un incendio real para comprender las señales de un incendio, pero si le permite interpretar de manera más selectiva y ayudarle en las decisiones a tomar si ha tenido experiencias similares.

La exposición previa al sonido de una alarma de incendio es una forma de aprendizaje que conduce al aprendizaje. Mediante formación y experiencias previas, una persona tendrá más herramientas para comprender el significado que transmite una señal de alarma [90], Los

ocupantes o el personal que han sido entrenados para la respuesta al fuego a través de simulacros de incendio deben reconocer más fácilmente las señales de alarma de incendio que otros ocupantes del edificio.

En un edificio público, cuando se dispara una alarma contra incendios, los ocupantes pueden no comprender necesariamente la señal como una alarma contra incendios porque hay una variedad de señales de advertencia en el entorno construido y es muy difícil que el público discrimine esas diferentes señales.

La reiteración de las señales de alarma puede generar indiferencia [117].

- El sonido de la alarma puede interpretarse como una actividad distinta a un incendio, como puede ser una alarma antirrobo.
- La creencia de que no es información suficiente y requiera confirmación.
- Identificar la señal como un simulacro y continuar la actividad habitual
- Percepción del riesgo no real
- Valorar a actividad que se está realizando por encima de la evacuación.

El diseño de la comunicación debe tener dos objetivos, el primero es llamar la atención del usuario para que comprenda que hay un peligro y el segundo, estimularle para que se traslade hasta una zona de seguridad.

Las alarmas de incendio, por sí solas, no son suficientes para que el ocupante perciba que existe una amenaza real. [118]. Como ejemplo, en el incendio de un edificio residencial donde fallecieron 6 personas, el 36% de los supervivientes mencionaron durante la investigación que su interpretación inicial no era una amenaza grave.

Por ello es necesario el diseño de unas señales de alarma que de manera inequívoca hagan interpretar a los ocupantes de la magnitud de la amenaza.

Desde la Universidad de Lund [119] se han publicado estudios al respecto.

La comunicación mediante una señal de alarma debe ser:

- Identificable
- Diferente a otras señales de advertencia
- Fiable

En sus estudios Canter, Powell y Booker [120] han sugerido par el diseño criterios para las alarmas de incendio basados en estudios empíricos

- El significado de la alarma de incendios debe ser obvio y distinto de otros tipos de alarmas
- Las alarmas de incendio deben ser indicadores fiables y válidos de la presencia de fuego
- Los ocupantes necesitan conocer la ubicación del incendio para poder autenticar la amenaza y planificar sus respuestas.
- Es necesario proporcionar información para asesorar a los ocupantes de los edificios sobre la respuesta más apropiada a una alarma, incluida la información sobre las rutas de escape

Además de la señal de alarma, es recomendable que los usuarios tengan información mediante mensajes de voz que les informen de lo que está sucediendo, qué deben hacer y cómo lo deben hacer [112].

Estos mensajes de voz pueden ser informaciones aportadas por los Equipos de Alarma y Evacuación o bien ser mensajes que o bien en directo o bien grabados, proporcionen esa información a través de la megafonía del edificio.

En el caso de los sistemas que combinan alarma y mensajes, la señal de alarma se utiliza como mensaje de atención y los mensajes de voz como información.

En la Tabla 17 se muestra un ejemplo de comunicación en caso de incendio.

Tabla 17. Recomendación en Suecia⁷⁰ de emisión de alarma y comunicación.

Secuencia de alarma	Intervalo de tiempo
Señal acústica. Llamada de atención	2 segundos a 10 segundos
Silencio	0,25 segundos a 2 segundos
Mensaje de voz	≤ 30 segundos
Silencio	0,25 segundos a 2 segundos

El mensaje completo debe ser breve y ofrecer toda la información en menos de 30 segundos, indicando lo que está sucediendo, utilizando si es preciso las palabras fuego o

⁷⁰ SBF (2003) *Utryminingslarm 2003* [Fire alarms 2003] Stockholm, Sweden: Brandförsvärsföreningens Service AB

incendio. Las palabras fuego o incendio captan la atención del usuario y provocan una mayor atención en el mensaje.

La importancia de tener una señal para atraer la atención de la gente ha sido demostrada por Cherry [121] en experimentos de laboratorio controlados, mediante voces masculinas y femeninas.

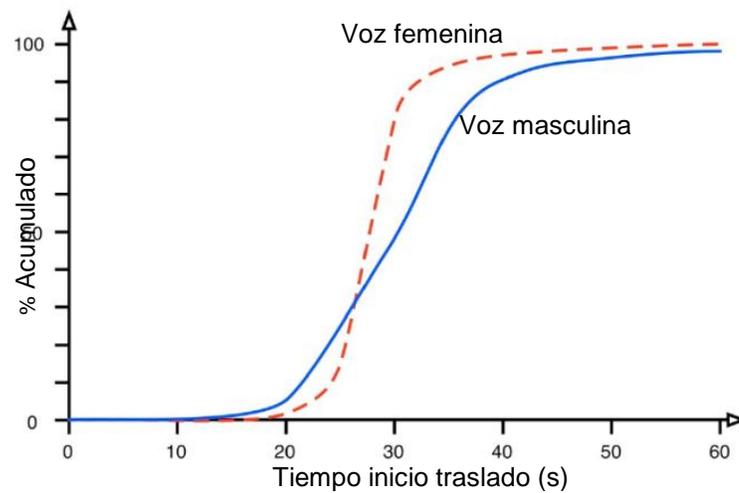


Figura 23. Atención a los mensajes

Al seleccionar una señal adecuada para las alarmas de voz, es relevante utilizar los criterios de Palmgren y Åberg [122]. Para que el mensaje sea efectivo debe contener información acerca de qué está ocurriendo, qué debe hacerse y cómo debe hacerse.

Tabla 18. Información contenida en los mensajes de evacuación efectivos

Información	Ejemplo
¿Qué ha sucedido?	Atención. Incendio en el edificio
¿Qué se debe hacer?	Deben evacuar de inmediato
¿Cómo se debe actuar?	Busquen su salida más cercana

La fase de pre- evacuación es crítica y requiere la atención de los técnicos. Debido a que no se disponen hasta ahora de datos fiables de la toma de decisiones de las personas en esta fase se debe procurar influir en la conducta para que el intervalo de tiempo sea el menor posible.

Otro aspecto importante a considerar es el entorno acústico, ya que el eco de la señal debe desaparecer antes de que se reproduzca el mensaje como el caso de los túneles que son entornos acústicos complejos debido al eco [123]

4.4.1. La comunicación. Señalización.

La señalización de los medios de evacuación son los distintivos, que regulados en la norma UNE 23034-88⁷¹ sirven como guía a los ocupantes de un edificio en las rutas de evacuación. Estos distintivos deben cumplir con unas características para que puedan ser visibles en condiciones adversas debido al humo o a la falta de iluminación.

⁷¹ UNE 23034:1988. Seguridad contra incendios. Señalización de seguridad. Vías de evacuación.

El Código Técnico de la Edificación en su Documento Básico de Seguridad contra Incendio establece los criterios para su instalación. Para todo caso, las señales deben ser visibles incluso en caso de fallo en el suministro al alumbrado normal. Cuando sean fotoluminiscentes deben cumplir lo establecido en la familia de normas UNE 23035:2003⁷². La disposición debe ser intuitiva y no debe requerir un esfuerzo de búsqueda por parte del usuario. El diseño y ubicación de las puertas de salida son fundamentales para que sean eficaces. Para mayor seguridad, debe tenerse en cuenta que cualquier diseño en la señalización debe ser contrastado.

La teoría de Affordances

Para poder entender cómo percibimos las cosas que se ven, Gibson [124] expone en su investigación cómo vemos el entorno que nos rodea, superficies, colores, texturas o la disposición, dónde estamos ubicados para ver algo determinado, la velocidad relativa respecto a lo que estamos viendo, es decir, explica cómo la gente percibe las cosas que ve. Según Gibson, la gente percibe los objetos en términos de lo que estos pueden ofrecer o permitir. De esta manera, una lata de refresco no es un cilindro metálico sino un medio para calmar la sed. Para comprender que es “affordance”, puede interpretarse como lo que el objeto ofrece a las personas en relación con el cumplimiento de su objetivo.

En el caso de estudio, uno de los objetivos de una persona involucrada en un incendio puede ser ponerse a salvo evacuando y accediendo a una zona segura. Este objetivo está relacionado con los objetos necesarios para interpretar cuál es el recorrido de evacuación más adecuado. De esta manera, la señalización debe ofrecer como indica Gibson la información

⁷² UNE 23035:2003. Seguridad contra incendios. Señalización fotoluminiscente.

para la evacuación con señalización perfectamente marcada, puertas de salida que se distingan del resto de los elementos del edificio y que sean fáciles de abrir.

Esta teoría se ha aplicado al diseño de salidas de emergencia y también se ha utilizado para explicar por qué ciertos diseños no son adecuados [125].

Esta misma teoría fue desarrollada a su vez por Hartson [126] quien sostiene que las prestaciones que proporciona un objeto pueden dividirse en diferentes categorías según la forma en que ayuden o apoyen al usuario. Para comprender mejor este concepto se puede apreciar que una puerta con una luz roja y sin ninguna indicación sugiere un peligro o un prohibido. En cambio, la misma puerta con una luz verde da a entender que se puede acceder por esa puerta, por tanto, es aquello que el objeto ofrece a los individuos en relación con el cumplimiento de su objetivo. En el caso de la evacuación de incendios, el objetivo es llegar a una zona segura.

Los cuatro tipos de “affordances” o capacidades de los objetos se pueden clasificar como:

- Capacidad sensorial

Las salidas de emergencia deben ser fáciles de encontrar. El diseño debe proporcionar, por lo tanto, una capacidad sensorial adecuada que ayude a los usuarios a detectar la salida durante la emergencia, por ejemplo, cuando el color de la puerta es muy distinto al de la pared que la contiene.

- Capacidad cognitiva

La observación de un objeto nos debe hacer comprender su funcionamiento, cómo debe ser utilizado. En el caso de las salidas de emergencia, las personas deben entender que la

puerta señalizada debe utilizarse en caso de emergencia y que su uso conduce a un lugar seguro. Toda esta información debe transmitirse a través del diseño.

- Capacidad física

La capacidad física permite que el usuario interactúe físicamente con los objetos, como abrir la puerta de salida de emergencia. La normativa establece que las puertas para salida de emergencia deben abrirse de manera muy sencilla y no debe exigirse mucha fuerza para poder abrirlas. Cuando se trate de un edificio con ocupantes que no estén familiarizados y se trate de puertas con apertura en el sentido de la evacuación, se consideran como válidos los sistemas de apertura de barra horizontal de empuje o de deslizamiento conforme a la norma UNE EN 1125:2009⁷³.

- Capacidad funcional

La funcionalidad ayuda a los usuarios a alcanzar su objetivo, es decir, a cumplir la tarea que se han propuesto realizar. Un objetivo en emergencias de incendios es evacuar hasta una zona segura lo más rápido posible. Otra característica que deben cumplir las salidas es que no debe haber un conflicto en la información que ofrecen. Si una salida de emergencia está diseñada de manera inapropiada, puede generar un conflicto durante la evacuación. Esto puede suponer que el usuario no perciba esa salida como un medio para evacuar. Por ejemplo, si una salida de emergencia tiene puesto un rótulo que de manera visible ponga “Uso exclusivo personal”, el usuario tendrá un conflicto al pensar que esa salida de emergencia es únicamente para el personal del edificio y se vea obligado a localizar otra a cierta distancia.

⁷³ UNE-EN 1125:2009. Herrajes para la edificación. Dispositivos antipánico para salidas de emergencia accionadas por una barra horizontal. Requisitos y métodos de ensayo.

En referencia a los diseños de salida de emergencia que pueden ayudar a las personas a encontrar a zona segura, Nilsson [21] expone al respecto que gracias a la teoría Affordances, se puede entender por qué hay diseños de salida de emergencia inapropiados. Si se analizan las capacidades sensoriales, cognitivas, físicas y funcionales que proporciona una salida específica, es posible identificar los posibles conflictos incluso en la etapa de diseño, evitándose posteriores cambios.

4.5. El humo

El humo es una mezcla visible de gases producida por la combustión de una sustancia, generalmente compuesta de carbono, y que arrastra partículas sólidas en suspensión. El humo es el producto resultante de una combustión incompleta o también un subproducto no deseado de la combustión. Es la primera causa de muerte en un incendio [1] y contrariamente a lo que pueda parecer, las personas durante la evacuación no tienen reparos en atravesar zonas inundadas de humo [127] como recoge Bryan en su investigación.

En este estudio se expone tras más de 2.000 entrevistas a supervivientes en incendios que el 60% de los encuestados se desplazó a través del humo. Un estudio similar en los EE.UU. con más de 500 casos, muestra que el 62,7% dijo que se movió a través del humo, incluso con una visibilidad extremadamente baja.

Aunque los ocupantes tuvieron la intención de atravesar el humo, muchos decidieron finalmente dar la vuelta por la propia causa del humo, por el calor o a una combinación de ambos. En el caso de la población del Reino Unido, el 26% tomó la decisión de volver al

punto de partida durante su evacuación y en el caso de EE.UU. decidieron volver el 18,3% de los entrevistados. La presencia del humo durante la evacuación de un edificio tiene una influencia directa tanto en los tiempos como en las trayectorias. Los efectos que produce en las personas pueden ser físicos, fisiológicos y psicológicos.

El humo es visible, puede percibirse por el olor y es un indicio claro del incendio, pero a su vez, la combustión incompleta de un elemento puede producir subproductos como el monóxido de carbono. La inhalación de monóxido de carbono no produce sensación de ahogo o asfixia, es inodoro e incoloro y, por tanto, no se percibe, pero sí produce síntomas como debilidad, cansancio, dolor de cabeza, náuseas, pérdida de la consciencia y en caso extremos, la muerte. [128], [129], [130], [131], [132]

La densidad y la toxicidad son las características que pueden hacer intransitable un recorrido inundado por humo y provocar la búsqueda de alternativas viables durante la evacuación. El humo tiende a la estratificación, lo que conduce a las personas a adoptar posturas incómodas y no naturales para desplazarse evitando el humo de las capas superiores, lo cual ralentiza la marcha.

Por tanto, el humo tiene dos características que influyen en la visibilidad. Puede ser irritante, impidiendo que se puedan mantener los ojos abiertos e incapacitante, impidiendo la visibilidad dependiendo del coeficiente de extinción

El coeficiente de extinción es un parámetro que determina en qué medida una sustancia absorbe la luz en una determinada longitud de onda [133], [76], [70], [134].

Considerando como distancia normal de visibilidad L_v [m], la relación con el coeficiente de extinción K [m⁻¹] sería:

$$K = \frac{3,9}{L_v}$$

Este parámetro se puede utilizar como referencia en la visibilidad de las personas que realizan la evacuación a través del humo. A mayor coeficiente de extinción, existe una mayor absorción de la luz por parte de las partículas en suspensión del humo y por consiguiente, es más complicado poder ver y desplazarse.

La falta de visibilidad a corto plazo evidentemente no tiene un efecto en las personas y no es incapacitan para trasladarse en una oscuridad total, aunque sí pueden llevar a un mayor tiempo en el recorrido.

Cuando una persona no tiene otra opción en una estancia inundada con humo, arriesgará para alcanzar la salida. En el caso de que pueda reconocer donde se encuentra, tomará la decisión de atravesar el humo o buscar una zona que considere segura para ser rescatado por los cuerpos de intervención.

En referencia a la toxicidad, la composición del humo influye de manera directa sobre la velocidad de evacuación. El humo irritante influye en la visibilidad y puede llegar a disminuir bruscamente la visibilidad, reduciendo la velocidad de 1m/s a 0,3m/s.

Esta reducción de velocidad produce mayor tiempo de exposición al calor y a los gases tóxicos de movimiento y una mayor exposición al calor y a los gases tóxicos y, por tanto, una mayor probabilidad de no tomar una decisión correcta para alcanzar una zona de seguridad. En

sus investigaciones Bryan [127] expone que las personas que evacuan a través de humo pueden llegar a tener una visión limitada de 3, lo que supone un coeficiente de extinción 0,76 (1/m). En el caso de humo con gases irritantes la distancia máxima puede ser de 5 metros.

Tabla 19. Efectos del humo en la velocidad

Densidad del humo (coeficiente de extinción)	Visibilidad aproximada	Efectos
Sin humo	No aplica	Velocidad 1,2 m/s
No irritante (1,15)	2 m.	Velocidad 1,0 m/s
Irritante (0,5)	Mínima	Velocidad 0,3 m/s
Levemente irritante (0,76)	3 m.	30% regresa

Por su parte, la investigación de Fridolf [135] muestra que la información sobre la velocidad de marcha prevista de los ocupantes a través del humo debe ser un factor a tener en cuenta por el proyectista. En esta investigación se hicieron experiencias acerca de la velocidad en condiciones de baja visibilidad por humo dentro de un edificio donde numerosos participantes debían desplazarse, de tal manera que podía relacionarse la velocidad con el coeficiente de extinción.

En la Figura 24 se pueden ver los resultados obtenidos de velocidad media de desplazamiento de cada participante en función del coeficiente de extinción, junto con la línea de regresión lineal y los límites de predicción de la curva ajustada (nivel de confianza del 95%).

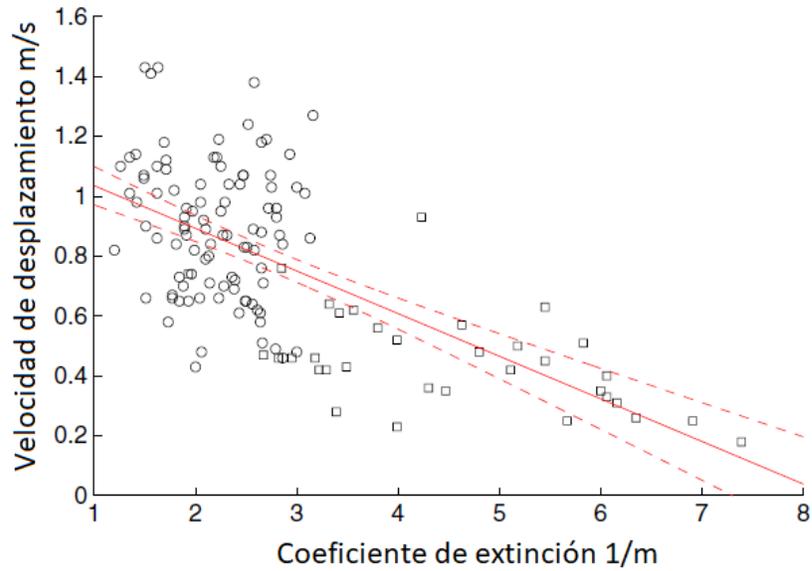


Figura 24: Velocidad media por participante en función del coeficiente de extinción

En el caso del espacio inundado con humo irritante o no irritante, los resultados obtenidos fueron:

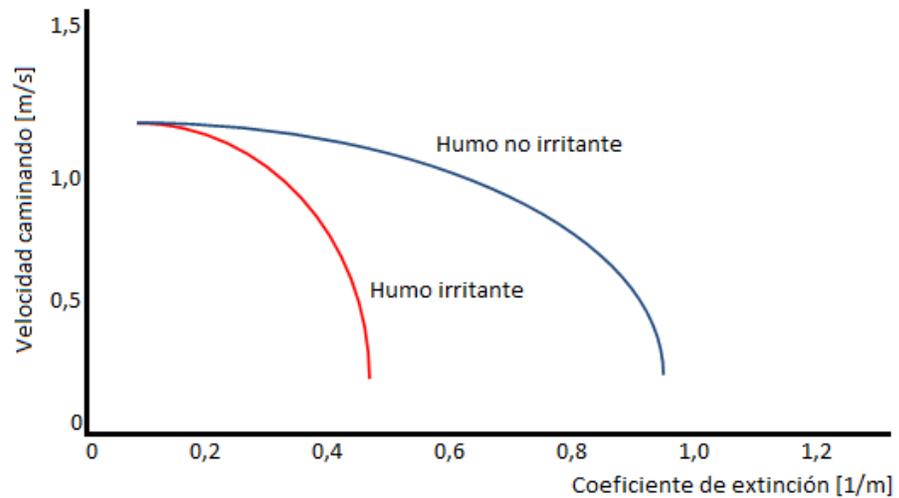


Figura 25. Velocidad de desplazamiento en función del tipo de humo.

Otros factores que tienen influencia en la velocidad de desplazamiento son la iluminación y el contacto con las paredes. La iluminación ambiental en un local con humo puede mejorar la visibilidad, así como una correcta señalización.

Empleando distintos sistemas de iluminación es posible mejorar la velocidad de evacuación con el mismo coeficiente de extinción. El humo, como se ha indicado, tiende a la estratificación por diferencia de temperaturas, lo que puede obligar a las personas afectadas a agacharse y reptar o caminar en cuclillas para evitar las capas superiores del humo. La velocidad en estos desplazamientos se reduce considerablemente, dependiendo de la densidad de ocupación del local.

$$\text{Velocidad arrastrándose [m/s]} = 0,7973 + 0,2909D - 0,1503D^2$$

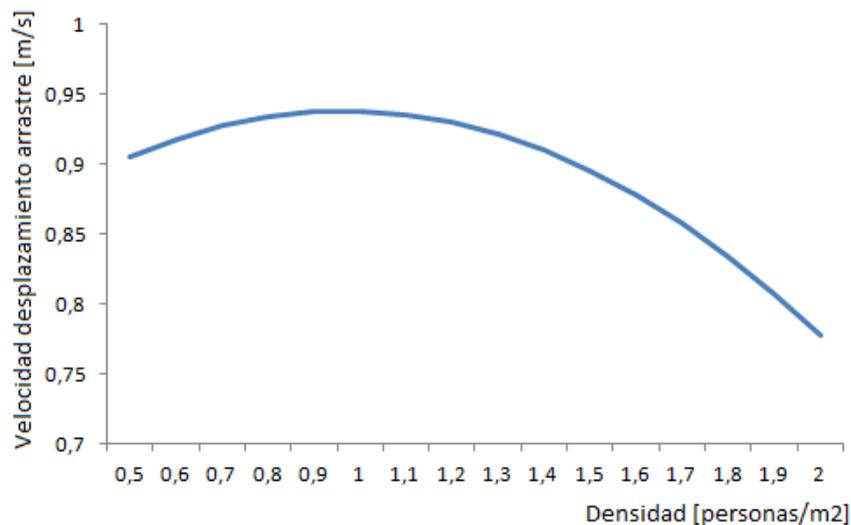


Figura 26. Velocidad de desplazamiento agachado en función de la densidad de ocupación.

Los efectos de caminar agachado pueden condicionar el comportamiento por diversos motivos:

- No permite observar el entorno más cercano y, por tanto, no existe seguridad de dónde estamos pisando.
- No permite ver dónde hay otras personas, incluyendo a familiares, amigos o personas que se desee ayudar en la evacuación.
- No permite ver el recorrido de evacuación idóneo, y por tanto, no permite ver cuál es la mejor salida de emergencia.
- La toxicidad produce irritación ocular y, por tanto, obliga en casos a mantener cerrados los ojos.
- El recorrido de evacuación puede tener otros riesgos añadidos que obligan a adoptar más precauciones, tales como cambios de desnivel, obstáculos etc.

4.6. Indicios de influencia en el comportamiento

Las características de los ocupantes son fundamentales para explicar y tratar de predecir o descartar el comportamiento en caso de incendio [3]. Estas características están relacionadas con el físico, los conocimientos y experiencias previas o la personalidad. El concepto de personalidad se considera en este trabajo como pensamiento, actitud o sentimientos respecto a terceros. La personalidad se supone relativamente estable a lo largo de la vida y por tanto, puede de algún modo predecirse en cada persona [136]. Es posible realizar una revisión teórica de los modelos o factores para definir la personalidad y, en particular, cómo pueden influir en caso de emergencia.

La primera suposición acerca del comportamiento humano en caso de incendio es la hipótesis de que una parte de los ocupantes entrarán en estado de pánico.

El trastorno de pánico [137] se define por ataques de pánico, inesperados y recurrentes. Cuando se da un episodio de ataque de pánico, este va seguido de un tiempo de al menos un mes en el que persiste la preocupación, ya que pueden darse nuevas crisis. El trastorno de pánico cursa con unos criterios concretos y se puede diferenciar de otros que también cursan con los mismos síntomas.

El ataque de pánico [138] se describe como “la aparición súbita de miedo y/o malestar intensos que alcanza su máxima expresión en minutos y ha de presentarse al menos cuatro de los trece síntomas descritos: palpitaciones, sacudidas del corazón o ritmo cardíaco acelerado; sudoración; temblor o sacudidas musculares; sensación de respiración dificultosa o miedo a atragantarse; dolor o molestias en el tórax; náuseas o malestar abdominal; sensación de vértigo, inestabilidad, mareo o desmayo; desrealización o despersonalización; miedo a perder el control o volverse loco; miedo a morir, parestesias y escalofríos o sofocaciones”.

En el caso del comportamiento en un incendio, numerosas investigaciones como las de Sime [12], Keating [13] o Quarantelli [14] han considerado que la idea del pánico como un “mito”. Esta idea de pánico ha sido alimentada en la ficción, pero sobre todo en los medios de comunicación con titulares como “Pánico en el incendio del complejo Laguna Village de Estepona” [139] o “Pánico por un incendio en la zona baja de San Marcos en Almendralejo” [140].

A pesar de estas informaciones, las evidencias en tal sentido son muy esporádicas en situaciones reales de incendio. La creencia de que los ocupantes atrapados en un incendio

entran en estado de pánico e intentarán huir en estampida, generando aplastamientos y provocando peleas es una interpretación que se sabe errónea.

Al contrario de esta suposición, las investigaciones parecen encontrar evidencias de justo lo contrario, es decir, los ocupantes toman en general decisiones racionales y altruistas cuando tienen la certeza de la situación en la que se encuentran incluso bajo una amenaza grave [25].

En las entrevistas realizadas después de los incendios se observa comúnmente que las propias víctimas mencionan que habían entrado en pánico durante el evento.

Según el estudio “Human behavior under fire situations- Portuguese Population” [141], el 93,3% de las personas encuestadas consideraron que en caso de incendio entrarían en un estado de pánico. En el mismo sentido, de las personas encuestadas que habían tenido una experiencia en un incendio real, un porcentaje similar respondieron que vivieron una situación que les produjo un estado de pánico.

Se puede concluir por tanto que, en las encuestas o entrevistas, las personas comúnmente mencionan pánico como sinónimo de estado de miedo o ansia que en realidad no llevan a decisiones irracionales. Tal como se ha mencionado en este estudio, los incendios son eventos poco habituales, por lo que el conocimiento previo de las personas para enfrentarse a estas situaciones es muy limitado y, por tanto, pueden tomar decisiones no adecuadas, pero por ello no tienen por qué ser irracionales. Algunas decisiones individuales durante el desarrollo del incendio parecen no ser adecuadas y estar tomadas en un estado de enajenación, sin embargo, un análisis detallado de estas decisiones en el momento en que se adoptaron puede dar lugar a entenderse como racionales. De hecho, estas decisiones de las personas se entienden como

racionales cuando se tienen en cuenta los indicios de los que disponen, su conocimiento y entrenamiento previo y el tiempo del que disponen para poder tomar decisiones.

Dentro de las ideas preconcebidas y a su vez erróneas que implica el pánico están las siguientes [142], [3], [12], [13], [14]

- El individuo que entre en pánico es el único responsable de sus errores

En una situación estresante como es el incendio, el individuo puede tomar decisiones incorrectas debido, por ejemplo, a una señalización o iluminación de emergencia inadecuadas que pueden confundir al individuo en la trayectoria de desplazamiento. La falta de experiencia previa, no tener familiaridad con el edificio o la búsqueda de seres queridos durante la evacuación pueden provocar decisiones incorrectas.

- No existen protocolos adecuados para los ataques de pánico.

El ataque de pánico en caso de producirse es temporal, no tiene por qué ser incapacitante y en algunos casos, se confunde con estados de ansiedad intensos. Por tanto, en la mayoría de los casos los protocolos de evacuación son válidos para todos los ocupantes del edificio. Una mala planificación en cambio sí puede ser el detonante para que grupos vulnerables no puedan acceder a zonas seguras.

- Las palabras fuego o incendio pueden provocar el pánico

Como se verá posteriormente, una comunicación con información veraz y concisa es necesaria para una evacuación con éxito. Las palabras fuego o incendio, además de atraer la atención del usuario, son necesarias para que éste pueda conocer el tipo de amenaza al que debe enfrentarse.

- Ocultar información o limitar la información evita los ataques de pánico.

Tal como en el caso anterior, la información veraz y completa es necesaria para una evacuación con éxito. Ocultar parte de la información produce no solo incertidumbre, sino un mayor intervalo de tiempo en la evacuación de los ocupantes.

- Hay temor a que puedan producirse casos de pánico.

Como se ha visto en puntos anteriores, la conducta habitual es la colaborativa. La psicología del grupo y el seguimiento a un líder dentro del incendio es la conducta habitual.

- El pánico es un comportamiento altamente contagioso.

El pánico como se ha visto anteriormente es un estado puntual y poco habitual. La influencia del grupo se ha demostrado que tiene un gran peso en las decisiones en caso de emergencia.

- El ataque de pánico convierte al individuo en una persona agresiva.

El ataque de pánico como miedo repentino y excesivo se relaciona en caso de incendio con una incapacitación para evacuar debido a una dificultad para controlar la respiración, entumecimiento de miembros, debilidad y mareos. El pánico tampoco debe confundirse con una sensación de angustia y miedo del individuo por no tener experiencia previa y tener la sensación de no tener todo el control de la situación. Esto no significa que esta sensación provoque incapacidad, inhabilitación o irracionalidad y sí estar relacionado con la incapacidad de tomar una decisión por no tener toda la información necesaria.

En los momentos iniciales de un incendio, al oler el humo o escuchar la alarma de incendios, se observa a menudo que los ocupantes no reaccionan y niegan o ignoran la situación. Esta actitud es muy común en edificios públicos donde se comparte el espacio con otras personas en el que los ocupantes no quieren reaccionar de manera exagerada por si la situación es una falsa alarma o es una situación que ya está bajo control.

Una vez que la persona asimila los indicios como un incendio, no implica necesariamente que intente evacuar de manera inmediata. En el incendio de un edificio residencial y según el caso, la persona podría tratar de reunir a sus seres queridos, a sus mascotas y perdería un intervalo de tiempo vistiéndose de acuerdo al clima que haga en ese momento, buscando las llaves, el teléfono o la cartera [143]. Ese intervalo de tiempo en el que el ocupante acepta que la amenaza es real y requiere una repuesta de desplazarse hasta una zona segura suele provocar retrasos en el inicio de la evacuación de un edificio o en la adopción de medidas de protección [106].

Kuligowski junto a otros investigadores [144] encontraron a partir de la observación en 14 evacuaciones de edificios, que existe un intervalo de tiempo desde que perciben la señal de alarma hasta llegar a las escaleras de evacuación que supone el 50% del tiempo total de evacuación. Por lo tanto, cuando los técnicos hacen una estimación del tiempo de evacuación de un edificio que están diseñando o bien están redactando los protocolos de evacuación, deben tener en cuenta estos intervalos de demora que son significativos. Estos tiempos pueden verse afectados por diversas circunstancias por causa del propio edificio, del desarrollo del incendio o por el perfil del ocupante. La Tabla 20 que se expone a continuación [145], presenta algunas de estas circunstancias que demoran el tiempo de evacuación.

Tabla 20: Factores que pueden influir en la toma de decisiones en caso de incendio

	Sensibilización	Atención	Comprensión	Proceso (amenaza/riesgo)	Toma decisión	Protección o Desplazamiento
Dinámica del incendio						
Humo poco denso				X		
Humo denso					X	X
Humo irritante	X					
Productos tóxicos			X	X	X	
Calor					X	X
Sin indicios	X	X	X	X	X	X
Características del edificio						
Edificio sin plan de emergencia					X	X
Alertas			X	X		
Falsas Alarmas			X	X		
Sobreinformación			X			
Ambiente con luz, ruidos, olores		X				
Información ambigua			X	X	X	
Compartimentación	X	X				
Salidas de emergencia ocultas					X	X
Familiaridad con el edificio					X	X
Personas						
Inacción de otros				X	X	X
Habitación		X				
Ansiedad		X	X		X	
Interacción con otros		X			X	X
Estado de no alerta		X	X	X	X	
Discapacidad sensorial	X				X	X
Discapacidad motórica					X	X
Discapacidad intelectual		X	X	X	X	X
Afiliación social					X	X
Rol / Responsabilidad					X	X
Compromiso	X			X	X	X
Sin experiencia previa			X	X	X	X

Conjuntamente con el conocimiento de los aspectos que pueden influir de manera directa en la demora de tiempo para la evacuación de los ocupantes, es interesante conocer las características de los ocupantes para explicar y predecir su posible comportamiento.

Esto incluye el perfil de los ocupantes, es decir, aquellos aspectos que le definen y caracterizan con parámetros como el sexo, la edad, cultura y la capacidad física u otros aspectos aprendidos como el conocimiento previo o la experiencia.

5. Factores del perfil del ocupante

La definición del comportamiento humano en caso de incendio que se presentó por primera vez en el folleto que anunciaba en Cambridge el Simposio de Comportamiento Humano en caso de incendio en 2012, fue planteada por consenso de los miembros del comité del programa.

El comportamiento humano en caso de incendio es el estudio de la respuesta humana, incluyendo la conciencia, creencias, actitudes, motivaciones, decisiones, comportamientos y estrategias para afrontarlo de las personas ante la exposición al fuego y otras emergencias similares en edificios, infraestructuras y sistemas de transporte. El estudio del comportamiento humano en caso de incendio es multidisciplinar, involucrando a profesionales del ámbito de la ingeniería, la arquitectura, la informática, las matemáticas, el derecho, la sociología, la psicología, el factor humano, las comunicaciones y la ergonomía, por mencionar sólo algunos. El enfoque principal de la investigación del comportamiento humano y su traslación a la práctica es minimizar el riesgo de las personas en los incendios. Esto se consigue generando y recogiendo datos cuantitativos y cualitativos sobre las respuestas humanas que pueden utilizarse para desarrollar la teoría de la conducta humana ante el fuego.

El objetivo por tanto del estudio del comportamiento humano es tener los datos y las herramientas necesarios para poder crear modelos de comportamiento y desarrollar una teoría integral de la conducta humana ante el incendio fuego.

El comportamiento humano es complejo. Los estudios que se realizan hasta la fecha tienen un carácter marcadamente específico, generando así mini teorías o teorías parciales [96], en lugar de una teoría general que pueda integrar todos los aspectos de la conducta en caso de incendio.

En este capítulo se identificarán las variables que definen el comportamiento humano. Si bien es imposible determinar el comportamiento de una única persona considerando las variables que marcan su perfil, sí es posible identificar la conducta por grupos.

No todas las variables del perfil de la persona determinan de manera esencial la conducta, pero sí es posible distinguir algunas que pueden influir de manera crítica. En la Tabla 21 se exponen algunas características que según Proulx [3] están relacionadas con la personalidad y los conocimientos de las personas y que pueden influir en su comportamiento.

Tabla 21: Factores de personalidad y conocimientos en caso de incendio

Perfil	Conocimiento y experiencia	Condiciones durante el incendio	Personalidad	Rol
Sexo	Familiaridad con el edificio	Solo o en compañía	Influencia por otros	Visitante
Edad	Experiencia en incendios	Activo o pasivo	Liderazgo	Empleado
Habilidades	Entrenamiento en incendios	Alerta	Negar la autoridad	Propietario
Limitaciones	Entrenamiento en otras emergencias	Drogas/Alcohol	Ansiedad	

A continuación, se expone de manera no exhaustiva cómo influyen algunas de estas características, de tal forma que puedan ser susceptibles de ser tenidas en cuenta para el objetivo de este estudio.

Sexo

Las diferencias entre hombres y mujeres en caso de incendio se han analizado en diferentes informes basados en casos concretos.

En edificios de uso residencial, se ha comprobado que los hombres tienden a combatir el incendio mientras las mujeres dedican más tiempo a reunir a la familia y llaman antes a los servicios de bomberos [95], [127].

Entre los datos obtenidos, una vez que los ocupantes tienen indicios del incendio, el 15% de los hombres buscaron el origen del incendio frente al 7% de las mujeres. El 7% de los hombres buscaron medios de extinción frente al 3% de las mujeres. En cambio, el 11,4% de las mujeres avisaron a los bomberos frente al 6% de los hombres. En relación con el comportamiento de evacuación, el 10,4% de las mujeres optaron por abandonar el edificio como primera medida frente al 4,2% de los hombres.

En edificios de uso hospitalario o en Centros de Salud, aparece la misma conducta, es decir, el personal masculino tiende a combatir el fuego mientras que el personal femenino en este tipo de centros dedica más tiempo a tomar medidas de protección y evacuación del colectivo de pacientes. [146]

Se debe tener en cuenta a la hora de analizar estos resultados, que los roles familiares entre hombre y mujer han ido evolucionando, por lo que las responsabilidades que antes podrían estar más diferenciadas, actualmente pueden haberse igualado. En este sentido, Horasen y Bruck realizaron estudios sobre el comportamiento en base a un cuestionario a alumnos de secundaria [147]. El estudio no arrojó diferencias significativas en referencia a la conducta probable entre alumnos y alumnas, aunque en un escenario en el que se encontrarán solos con indicios de incendio, las alumnas respondían mayoritariamente que evacuarían inmediatamente y los alumnos respondieron que buscarían un extintor.

Edad

La edad es uno de los factores en los que se entiende más fácilmente cuál es su influencia. Actualmente en España se están haciendo intervenciones en los edificios para adaptarlos y hacerlos accesibles para dar cumplimiento al Real Decreto Legislativo 1/2013⁷⁴. Esta adaptación, que es esencial para el colectivo de las personas con discapacidad motórica, también es muy importante para las personas con movilidad reducida entre ellas la población más mayor.

Los estudios de evacuación que se realizan con voluntarios para medir las velocidades suelen hacerse con jóvenes estudiantes, pero hay estudios que tienen en cuenta las diferencias de edad. Kose [148] clasifica las diferencias de rendimiento entre los participantes utilizando tres categorías: habilidades sensoriales, toma de decisiones y acción, es decir, la movilidad.

⁷⁴ Real Decreto Legislativo 1/2013, de 29 de noviembre, por el que se aprueba el Texto Refundido de la Ley General de derechos de las personas con discapacidad y de su inclusión social.

En las tres categorías, existe un descenso en el rendimiento en función de la edad cuantificable, pero no ha sido posible conocer la vinculación entre la edad y ese descenso del rendimiento.

Por otro lado, existe una relación entre la edad y la capacidad para soportar la exposición al incendio [149], como puede ser el calor o la inhalación de los productos tóxicos generados debido a las diferencias entre la constitución física a distintas edades y los problemas de salud que puedan tener [150].

Habilidad y discapacidad

La constitución física del individuo puede tener influencia en las decisiones que toma durante todo el proceso. Una buena constitución física proporciona herramientas para afrontar retos, como puede ser subir escaleras varias plantas para acceder a una zona segura [144] o bien velocidad para atravesar una zona inundada por humo. Las personas con peor constitución física pueden calcular que hay tramos o desplazamientos que no van a poder afrontar, por lo que buscarán alternativas que quizás requieren más tiempo, como puede ser el confinamiento en un sector alternativo.

El caso más complejo en este ámbito es el de las personas con discapacidad [151]. El colectivo de las personas con discapacidad es un grupo vulnerable que, dependiendo del tipo de discapacidad, sensorial, motórica, cognitiva, orgánica tienen más dificultad para reducir los tiempos en todas y cada una de las fases de la evacuación.

Es evidente que una persona sorda tardará más tiempo en percibir las señales de alarma, una persona ciega que además no tenga familiaridad con el edificio, no podrá por lo general, acceder a la información para la evacuación como pueden ser las señales de evacuación. Las personas con discapacidad intelectual o discapacidad cognitiva [152] tienen más dificultad en comprender lo que sucede en su entorno y dependiendo del grado de discapacidad, más dificultad en tomar la decisión del inicio del desplazamiento.

Las investigaciones en este ámbito suelen limitarse a los procedimientos de evacuación de centros en los que habitualmente hay personas con discapacidad intelectual. [153]

La mayoría de las investigaciones sobre este tema presentan estudios de casos concretos en los que se han conseguido evacuar personas con discapacidad intelectual gracias a refuerzos de personal en los procedimientos, además de entrenar de manera constante los citados procedimientos. Según los estudios disponibles, es posible entrenar siempre y cuando haya un trabajo constante y a largo plazo. El entrenamiento debe repetirse periódicamente para asegurar que no se olviden los procedimientos aprendidos. [154]

En el caso de la discapacidad motórica, las escaleras de evacuación pueden ser imposibles sin ayuda⁷⁵ y en caso de no estar familiarizados con el edificio, tener más dificultad para saber cuáles con los sectores alternativos de incendio o dónde están ubicadas las zonas de refugio.

Los ocupantes con problemas de movilidad o con movilidad reducida incluyen a los que tienen algún tipo de limitación de movimiento, y no necesariamente sólo a los usuarios de

⁷⁵ Véase Figura 1

sillas de ruedas [151]. En el ámbito de la evacuación se puede hacer una distinción entre aquellos que no tienen ninguna posibilidad en llegar por sus propios medios hasta una zona segura y aquellos que, aun teniendo limitaciones, pueden acceder. [155]

De esta manera, es posible diseñar procedimientos de evacuación específicos dependiendo del grado de movilidad de las personas.

En el caso de las personas con discapacidad visual, se considera que hay una gran variedad de niveles de pérdida de visión, por tanto, no se consideran solo aquellas personas que no tienen ninguna percepción visual, también pueden considerarse personas con cataratas, glaucoma y otros impedimentos que no permiten al usuario poder evacuar un edificio sin ayuda.

Los ocupantes con discapacidad visual familiarizados con el edificio por lo general no deben tener problemas para evacuar por sus propios medios. [156]. La velocidad que pueden alcanzar en escaleras es muy similar a las personas sin discapacidad. Sin embargo, si la iluminación de dichas escaleras es la de emergencia, es decir, una iluminación significativamente inferior a la habitual, las personas con discapacidad visual podrían tener más dificultades o que puede suponer entre un 50% y un 80% más lenta que las personas sin discapacidad.

En el caso de que las personas con discapacidad visual deban evacuar por un recorrido de evacuación no habitual, es posible que puedan necesitar ayuda externa para alcanzar la zona de seguridad en un tiempo adecuado, por ejemplo, mediante personal dedicado como E.A.E. o perros guía. Otro problema que puede generarse es debido a que las personas con discapacidad visual pueden orientarse gracias a los sonidos que se generan en su entorno. Si

estos sonidos son ahogados con el sonido de una alarma de incendios, podrían tener una dificultad para poder orientarse. [157], [158].

En el caso de las personas con discapacidad auditiva, según la OMS⁷⁶ [159] la pérdida de audición puede deberse a causas genéticas, complicaciones en el parto, algunas enfermedades infecciosas, infecciones crónicas del oído, el empleo de determinados fármacos, la exposición al ruido excesivo y el envejecimiento. Las dificultades auditivas pasan por no percibir ciertas frecuencias que en el caso de las señales de alarma podrían tener [160].

Las alarmas visuales ayudan a las personas con discapacidad auditiva a interpretar que existe una amenaza mediante flash estroboscópico o luces parpadeantes. Los dispositivos visuales de alarma (VAD) en España deben de cumplir con la Norma UNE-EN 54-23⁷⁷, con una tasa de destello entre 0,5 Hz y 2 Hz.

Conocimiento previo. Familiaridad con el edificio y entrenamiento.

El conocimiento del edificio y familiaridad con las rutas de evacuación tienen influencia en el proceso de evacuación. En condiciones adversas, como el bloqueo de salidas o la necesidad de buscar rutas alternativas, el conocimiento del edificio es fundamental. [161]

En edificios de uso residencial, el entrenamiento mediante simulacros de incendio proporciona a los ocupantes toda la información necesaria para evacuar el edificio, pero en otros casos, como los edificios de uso comercial en los que el público hace visitas esporádicas,

⁷⁶ Organización Mundial de la Salud

⁷⁷ Norma UNE-EN 54-23:2011 Sistemas de detección y alarma de incendios. Parte 23: Dispositivos de alarma de incendios. Dispositivos de alarma visual (VAD).

el uso de la señalización es fundamental para dirigir el flujo hacia las rutas de evacuación más adecuadas.

Asimismo, estos últimos no suelen estar familiarizados con los sistemas de alarma y el intervalo de tiempo de la evacuación puede ser mayor.

Proporcionar señales de salida para indicar las rutas de salida no garantiza que los ocupantes se fijen en las señales o utilicen esas salidas para salir del edificio [162]. Las personas en cualquier edificio público están continuamente expuestas a las señales de salida de emergencia, pero no las utilizan dado que dichas emergencias por un incendio no son habituales [166]. Este hecho provoca que los usuarios no utilicen esta información, dado que no proporciona una información funcional en una situación cotidiana y por tanto, es poco probable que los ocupantes estén concienciados del uso de esta información esencial durante una experiencia estresante. A estos aspectos se debe añadir que el usuario, por norma general, buscará evacuar por la ruta de entrada que es la que conoce. Cuando esa ruta de entrada conocida queda bloqueada, sería entonces cuando los ocupantes podrían confiar en las señales de salida para encontrar una salida alternativa.

El entrenamiento es otro método de conocer tanto el edificio como los procedimientos establecidos de evacuación. Para ello se establecen los simulacros de incendios, que se plantean como una parte de la implantación y mantenimiento de los planes de evacuación de un edificio.

La realización de simulacros tiene como objetivos [163] detectar deficiencias de los procedimientos de evacuación, la adecuación y el adiestramiento de los recursos humanos,

comprobar la dotación de medios, comprobar la ubicación y uso de los medios técnicos, así como la efectividad de los procedimientos de actuación.

Los simulacros pueden ser generales o parciales, dependiendo si involucran a toda la actividad o edificio o bien solo a parte de éste.

La exposición previa a un sistema de alarma específico lleva a las personas a comprender la amenaza y a tomar decisiones de manera más rápida y, por tanto, tendrá más probabilidades de entender el significado que transmite una señal de alarma [16].

Los ocupantes habituales del edificio, así como el personal encargado de ayudar en las tareas de evacuación, como pueden ser los equipos de E.A.E. se entrenan mediante formación y simulacros y, por tanto, deben tener asimilados los sonidos de la alarma que indican una amenaza [117]. En un edificio de pública concurrencia, la probabilidad de que los ocupantes no habituales comprendan la señal de alarma es menor. [116]

Proulx [164] realizó una investigación al respecto para evaluar el recuerdo, la identificación y la urgencia percibida ante una determinada señal de alarma denominada *Patrón temporal-3*. Esta señal de alarma era la que se había determinado como el patrón internacional para la alarma de incendios. Los resultados mostraron que sólo el 6% reconocía o asociaba este patrón con una señal que indicara amenaza por incendio o evacuación inmediata. Los resultados muestran que el entrenamiento mediante formación y simulacros es esencial para que los ocupantes identifiquen los indicios que proporciona la señal de alarma de incendios.

Influencia del grupo

El comportamiento de un ocupante de un edificio durante una actividad se ve influido si está solo o está dentro de un grupo [77], [165], [166]. Se ha comprobado que, en caso de alarma, la decisión de un individuo está condicionada por lo que haga el resto. Esto puede crear la paradoja de que nadie inicie el desplazamiento a una zona de seguridad porque no ven que otros tomen esa decisión, aunque existan indicios y evidencias claras del incendio.

Por el contrario, si uno de los ocupantes toma la decisión de evacuar, el resto del grupo [94], que pueden tener una personalidad más influenciable, le seguirá incluso en la misma ruta o recorrido de evacuación. De esta manera también puede darse la paradoja de que un grupo elija un recorrido de evacuación incorrecto o menos seguro si uno de los integrantes del grupo lo elige. Se sabe, por tanto, que cuando se crean grupos en caso de incendio los integrantes de éste tratan de mantenerse unidos.

Durante la experiencia de un incendio el grupo no es la suma de cada uno de los individuos que componen dicho grupo, [167]. Tampoco puede determinarse que el grupo actúa como una única entidad o como una sola mente.

Los casos estudiados en incendios reales demuestran que el grupo en caso de incendio se constituye como una variedad de individuos diferentes. Durante el proceso del incendio, una de las actitudes que toma el grupo es la división de roles en la que los componentes del grupo asumen unas funciones concretas que pueden estar basadas en sus experiencias y relaciones con otros miembros del grupo [167].

La psicología del grupo en caso de emergencia puede también crear relaciones de jerarquía entre los miembros de dicho grupo [168]. Las normas que rigen un grupo en estos casos tienen tres dimensiones: Consciencia, recursos y compromiso.

- Consciencia

Dentro de la consciencia hay dos etapas, una primera de abnegación o de comprender la prioridad del grupo frente al individuo, y una segunda etapa de captación del rol centrada en el grupo y en la situación. De esta manera en el caso de un incendio, las personas con más experiencia en incendios o emergencias aceptan el rol de líderes, y aquellos que pueden ser líderes en otros ámbitos como el profesional dentro de una gran compañía, aceptan el rol de apoyo a los líderes.

- Recursos

Un aspecto de relación social dentro del grupo es el manejo de los recursos. Aquellos que tienen conocimientos y habilidades para el uso y manejo de los recursos de manera individual pueden dirigir a los demás para el aprovechamiento de los recursos.

- Compromiso

La participación en las tareas anteponiendo el interés del grupo por encima del propio, demuestra el compromiso y, a su vez, un estatus individual de influencia frente al resto del grupo. [168]

Finalización del objetivo

Las personas que están inmersas en un espacio y en una actividad tienen tendencia a continuar dicha actividad y finalizar el objetivo que se han impuesto [166]. Esto sucede incluso que cuando existan indicios de la presencia de una amenaza. Algunos casos simples en los que puede prevalecer el objetivo antes que el cambio de actividad pueden ser finalizar una llamada telefónica o completar el texto en un archivo.

Cuando una persona ha hecho una inversión de tiempo en una actividad es más propenso a tratar de finalizarla, aun percibiendo los indicios de una emergencia de incendio [90]. De este modo, un cliente de un restaurante o un cliente en un supermercado esperando en la línea de cajas tratarán de prolongar lo máximo posible su estancia antes de tomar la decisión de evacuar a pesar de los indicios para completar sus objetivos.

Otra consideración que debe tenerse en cuenta es la *influencia de la cultura*. La diferencia cultural influye en el proceso de toma de decisiones, tanto por cómo se entienden las relaciones entre las personas, la organización y la responsabilidad de cada persona. [17], [169], [170], [171]. En el caso de estudio, dado el perfil de los participantes no ha sido posible plantear diferencias culturales.

6. Los datos en el Comportamiento Humano en caso de Incendio

Hasta la fecha, los estudios que se han realizado en el ámbito del comportamiento humano han llevado a una generar mini teorías parciales que no han sido capaces de desarrollar una comprensión global de la conducta humana en caso de incendio. [96]

Esto se debe, por un lado, a que es un campo multidisciplinar⁷⁸ y por otro, a la evolución de las teorías del comportamiento. Los conocimientos no están adecuadamente respaldados o verificados con los datos disponibles, [172] dado que dichos datos no suelen ser suficientes, o no exhaustivos o detallados. Esta limitación que obliga a trabajar con datos que no están del todo respaldados y, por tanto, el investigador debe encontrar el método más adecuado para su propio estudio de captación y recogida de datos.

En resumen, el conjunto de datos empíricos sobre el comportamiento humano no está fácilmente disponible, dado que cuando se captaron, se obtuvieron para unas experiencias y estudios muy determinados, los datos pueden estar muy dispersos en distintos trabajos y pueden ser utilizados por el investigador sin un conocimiento del contexto en el que se obtuvieron. En caso de que el investigador necesite captar y registrar nuevos datos, estos tampoco son fáciles de obtener.

Por tanto, para poder usar datos obtenidos en distintas experiencias se debe conocer:

- Las condiciones de contexto en las que se obtuvieron los datos.
- El procedimiento por el cual se obtuvieron.
- Una representación detallada de los datos.

Uno de los objetivos de esta tesis es proporcionar al investigador un protocolo flexible para poder obtener datos de comportamiento humano en caso de emergencia de incendio que pueda cumplir los puntos anteriores.

⁷⁸ Simposio de Comportamiento Humano en caso de incendio. Cambridge 2012

6.1. Técnicas actuales para la captación y registro de datos

La captación de datos de comportamiento puede realizarse mediante distintos métodos de investigación. Como se ha visto anteriormente, es importante conocer en qué contexto y cómo se obtuvieron los datos ya que pueden influir en la validez interna y externa [173].

La validez interna es la medida en que las relaciones de causa y efecto pueden identificarse con precisión, y la validez externa se refiere a si los resultados del estudio son generalizables a un entorno de la vida real. Si se hace una prueba a un sistema de alarma para comprobar si los participantes entienden que deben evacuar, la validez externa será mayor si no se avisa a los citados participantes, es decir, la experiencia será más similar a un caso real.

La fiabilidad de los datos viene dada si es posible repetir el estudio en las mismas condiciones para lo cual el estudio debe estar debidamente documentado.

El investigador debe establecer la validez y fiabilidad del conjunto de datos utilizado analizando su idoneidad y determinando si son representativos, son coherentes y se presentan de forma detallada y completa.

6.1.1. Clasificación de los métodos de investigación

La clasificación que hace Gwynee [172] de los métodos de investigación lo divide en dos grandes grupos: *Ensayos experimentales* y *Casos de estudio*. A continuación, se exponen de manera no exhaustiva ambos grupos.

- Ensayos experimentales.

En los ensayos experimentales se realiza una observación en participantes que con conocimiento previo o sin él, actúan o relatan como prevén que actuarían en una emergencia de incendio.

- Escenarios hipotéticos.

Este método de trabajo implica el visionado de imágenes o de un entorno simulado en el que los participantes son conscientes de estar involucrados en la investigación. En este tipo de ejercicios los participantes exponen, desde su punto de vista, cómo prevén que sería la toma de decisiones en los casos presentados.

- Experimentos controlados

Este método implica la preparación de un escenario o laboratorio donde los participantes tienen conocimiento previo de los ensayos que se llevan a cabo. Este tipo de experimentos analizan casos concretos como puede ser el movimiento en un determinado entorno y en unas condiciones de contexto concretas [174] o el comportamiento en una situación específica en el que un participante se queda solo ante una amenaza. El investigador al conocer cómo se han obtenido los datos de comportamiento puede integrar en sus conclusiones este hecho.

- Realización de simulacros.

Los simulacros pueden ser generales o parciales, según se expuso anteriormente, y pueden a su vez ser anunciados o no. Como ejemplo de

simulacro anunciado y parcial puede ser el de un centro donde residen personas de colectivos vulnerables o edificios con un gran número de participantes como un edificio en altura. [175].

- Estudios de casos / Investigaciones formales de incidentes.

En los estudios de casos se analizan los informes oficiales de sucesos reales [172]. El procedimiento para ello es buscar la cadena de hechos que han llevado al suceso en lugar de hacer estimaciones cuantitativas de tiempos.

Las técnicas para la captación y registro de datos son los instrumentos que utiliza el investigador para su posterior análisis. Debido a la poca fiabilidad de estos, es habitual utilizar más de una técnica para posteriormente contrastar los datos. Las técnicas habituales contrastadas para obtener datos son mediante cuestionarios y encuestas, la observación de los participantes y los simuladores informáticos. [172]

- Encuestas y cuestionarios

El cuestionario es un conjunto de preguntas para obtener información de una persona en particular. De este modo se pueden conocer las decisiones que tomaría o ha tomado en un momento concreto y con unos factores conocidos.

La encuesta, en cambio, requiere de datos de perfil del participante para analizar el colectivo al que pertenece y así poder realizar análisis de carácter estadístico.

Los participantes en este caso son conscientes de que están participando en una investigación.

- Observación directa

Se basa ante todo, en registrar datos de los movimientos que realizan los participantes por diversos métodos. El investigador debe tener en cuenta el método de observación para poder analizar los datos obtenidos.

- Cámara de vídeo estática

Proporciona información de un punto concreto del recorrido de evacuación. Puede utilizarse una cámara que se instale a tal efecto o también, pueden utilizarse las cámaras de seguridad que ya tenga instaladas el edificio.

- Cámara de vídeo dinámica

Proporciona imágenes del progreso de una persona o permite captura de condiciones progresivas experimentadas por las personas o grupos

- Fotografía fija

Proporciona información estática de un punto concreto en un determinado momento

- Observador externo

La información que se obtiene es descriptiva por parte de un observador ajeno a la evacuación. Puede ser observación de un determinado punto del recorrido o bien porque el observador se traslada con uno o varias personas que realizan la evacuación.

- Participante

La observación la realiza en primera persona por alguno de los participantes, ya sea con o sin conocimiento de la experiencia.

- Dispositivos sensores electrónicos

Los participantes dan su consentimiento para llevar el dispositivo durante la evacuación y se registran posteriormente o en tiempo real sus movimientos

- Escaneo del entorno

Se registra el movimiento de las personas mediante sistemas de visualización grupales, como los infrarrojos, láser u otro dispositivo similar.

- Simulación de datos

Se basa en la investigación de la evacuación bajo supuestos que se introducen como datos. Permite el análisis de supuestos que no pueden reproducirse en casos reales y permiten incorporar factores como las llamas o el humo que podrían afectar a la integridad física de los participantes en cualquier otro caso.

6.1.2. Técnicas para la captación de datos

Existen diversas técnicas para la captación de datos. Estas técnicas pueden utilizarse de manera independiente o combinada para contrastar la validez y fiabilidad de los resultados de la investigación [172]. Estas técnicas se pueden clasificar en los siguientes grupos: Encuestas, observaciones, exámenes y simulaciones.

- Encuestas

Las encuestas en este campo consisten en un conjunto de preguntas tipificadas y dirigidas a una muestra representativa con el fin de obtener información acerca de una situación concreta.

El análisis de los datos obtenidos mediante encuestas busca la opinión o la previsión de las decisiones que podría tomar el encuestado en un caso concreto de emergencia.

Las encuestas en este sentido pueden ser de respuesta abierta o cerrada, y pueden ser en cualquier formato, incluyendo la encuesta telefónica o la presencial.

- Observaciones

Los datos se recogen mediante la observación de los movimientos y acciones que toman los participantes y no es necesaria la comunicación verbal.

Los datos en este caso pueden ser tiempos, espacios, trayectorias y ser precisos al no depender de sensaciones u opiniones.

- Cámara de vídeo estática

Las grabaciones en este caso se realizan en puntos concretos dentro del edificio donde se prevé pueda captarse información acerca del propósito de la investigación. En estos casos es posible el uso de cámaras de circuito cerrado o cámaras de seguridad ya instaladas en el recinto. Esta fuente de información proporciona datos tanto del comportamiento en un caso de emergencia como en una situación de flujo habitual sin emergencia, pudiendo compararse ambas situaciones.

- Cámara de vídeo itinerante

En este caso la grabación de las imágenes se hace desde una cámara que puede desplazarse dentro del recinto, permitiendo tener una perspectiva progresiva a lo largo del tiempo de un participante concreto o de un grupo de participantes.

- Fotografía fija

La fotografía fija permite la visualización y análisis en detalle de un punto concreto en un instante determinado.

- Observador humano estático

En este caso, un observador registra los datos en un punto determinado del edificio donde se prevé se precise obtener información concreta para el caso investigado.

- Observador humano itinerante

El observador participa de la evolución de los sucesos dentro del edificio, acompañando a un grupo concreto de participantes o desplazándose según una ruta preestablecida para obtener datos en distintos puntos.

- Dispositivos o sensores de medición incorporados

Los dispositivos instalados en participantes permiten el rastreo de los movimientos en tiempo real y mediante los datos obtenidos, es posible analizar las decisiones tomadas de cada uno de los participantes de manera individual. En este caso, los participantes son conscientes de la investigación. Este seguimiento también puede realizarse mediante aplicaciones instaladas a tal efecto en el teléfono móvil de cada uno de los participantes

- Dispositivos no visuales

En estos casos se utilizan dispositivos que utilizan técnicas como el láser, para identificar el movimiento de las personas, pero no pueden hacer una identificación particular de los participantes.

- Simulación

La simulación informática es una técnica que genera datos principalmente en casos en los que es difícil o imposible utilizar las técnicas anteriores, por no poderse analizar in situ en tiempo real, como puede ser el caso de un incendio o bien porque ha sido un suceso concreto ya sucedido del que se conocen las condiciones suficientes para poder simularlo. En este caso, los datos dependen de la información previa programada y la potencia del simulador, como puede ser la evacuación de un edificio o infraestructura con miles de participantes.

Otra técnica para recoger datos es el análisis de informes proporcionados por otros investigadores mediante literatura académica o bien fuentes periodísticas. [54], [62], [64], [80]. El investigador en estos casos, debe tener en cuenta el origen y cómo se obtuvieron los datos para poder incluir el contexto como parte de su análisis.

6.1.3. Simuladores informáticos

La simulación es una herramienta de análisis que tiene un objetivo concreto y que nos permite investigar y analizar datos sin la necesidad de trabajar en el espacio real que simula. En el caso del comportamiento humano en caso de incendio, es evidente que la simulación informática es necesaria para analizar con seguridad casos que de otro modo serían imposibles. Los datos obtenidos dependen, por un lado, de la programación que se ha realizado para desarrollar el simulador y por otro, los datos que se introducen para obtener resultados [176], [79]. Estos simuladores son válidos para la investigación del comportamiento

de las personas en condiciones límite, pudiendo incluso analizarse los casos de las personas que no consiguen evacuar. [146]

Los actuales simuladores de movimiento de personas proporcionan información de una gran cantidad de personas desplazándose en el mismo edificio. Son herramientas indispensables para los ingenieros y arquitectos que diseñan grandes espacios donde hay circulación de personas como estadios de fútbol, salas de conciertos o intercambiadores de transporte.

Las herramientas de simulación disponibles recrean los espacios y movimientos con el fin de identificar los riesgos de aglomeraciones y embotellamiento producidos por el flujo de personas. Los modelos se construyen fácilmente utilizando herramientas incorporadas tipo CAD en 2D y 3D. Existen en el mercado varios simuladores de gran potencia que aportan la información a través de avatares que se desplazan a través de entornos virtuales diseñados. Algunos de estos simuladores son los de las compañías de software Oasys Massmotion, [101], Thunderhead Pathfinder [102], o el programa Legion de la empresa Bentley [100]. En todos los simuladores, el procedimiento para introducir los datos de programación previos es relativamente similar.

- Diseño del escenario.

Los escenarios pueden ser gráficamente muy sencillos para el cálculo y de esta manera consumir menos recursos. Así los elementos dentro del entorno virtual pueden ser líneas simples que los avatares deben evitar.

- Incorporación de avatares

Se introducen los datos relativos al número determinado de avatares o personajes que van a participar en la simulación, así como sus perfiles. Si el local o edificio va a tener distintos tipos de usuarios, por ejemplo, por edad o sexo, se puede hacer un diseño de cada uno de los perfiles y posteriormente, asignar dichos perfiles a un número determinado de avatares.

- Origen del movimiento

Se debe definir el punto de inicio del movimiento individualmente o por grupos. El punto de origen puede ser una zona delimitada por el programador o bien puede determinarse que sea toda la superficie del entorno virtual, distribuyendo de forma irregular o aleatoria el propio programa a los avatares participantes. Esta elección del punto de origen dependerá del objetivo que pretenda el investigador.

- Punto final o destino.

Se debe definir el punto final o destino. También pueden diseñarse diversos puntos, e incluso puntos intermedios, por los que un determinado avatar debe pasar antes de acceder a la salida o punto final.

- Factores que influyen en el movimiento

Se pueden programar factores como la envolvente individual virtual, la velocidad, los cambios de velocidad o los cambios de trayectoria.

- Tiempo retardo para inicio del desplazamiento.

En este caso el programador decide bajo su criterio qué tiempo transcurrirá antes de que cada avatar inicie su movimiento o qué comportamiento deberá tener una vez al iniciarse la evacuación. Este tiempo es el que se ha denominado tiempo de pre-evacuación, por lo que el

programador para su lección debe tener un conocimiento profundo en materia de comportamiento humano.

Una vez iniciada la simulación, cada avatar tiene un comportamiento individual en el que se desplaza para ir desde su punto inicial hasta su punto final buscando un recorrido eficiente, evitando el contacto con mobiliario y guardando la distancia prefijada o envolvente virtual con otros avatares.

A continuación se muestran ejemplos de algunos de los simuladores mencionados.

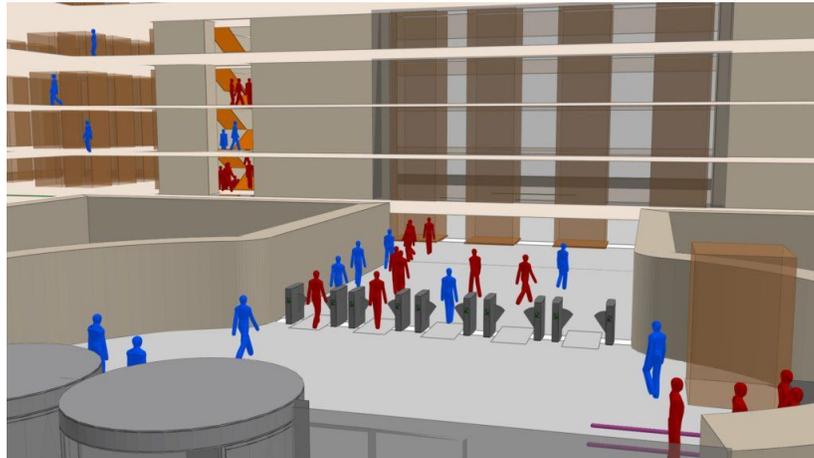


Figura 27. Captura de pantalla del software Oasis Massmotion

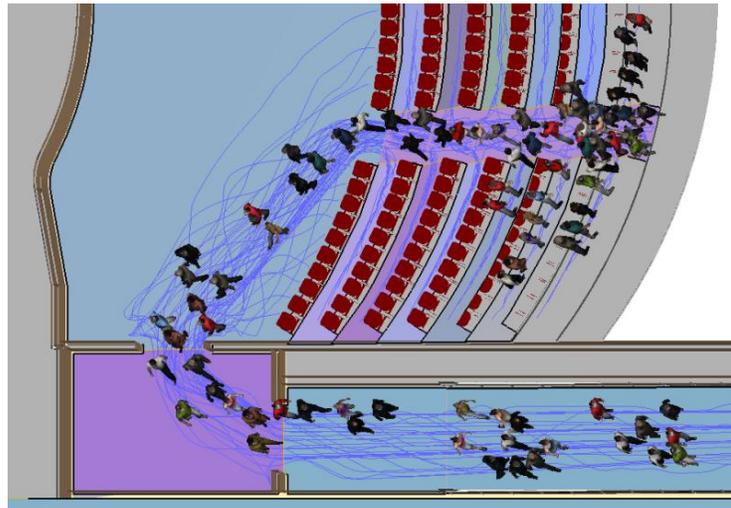


Figura 28. Captura de pantalla del software Pathfinder Thunderhead.

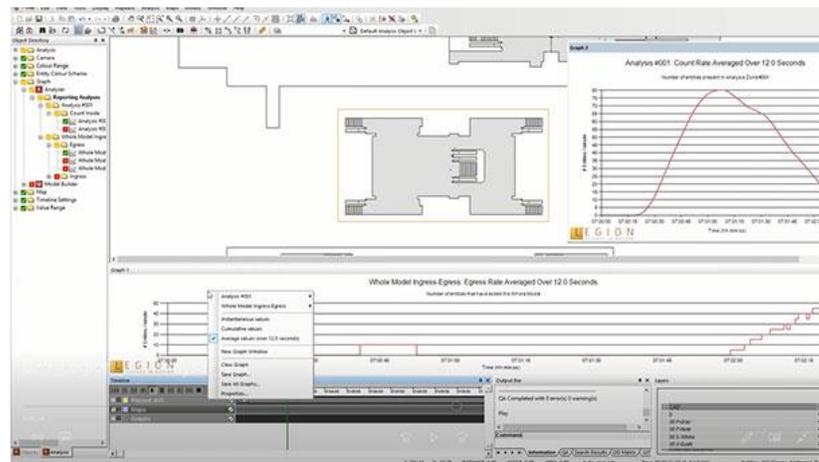


Figura 29. Captura de pantalla del software Legion.

En este desplazamiento la inteligencia del avatar no le permite tomar decisiones relacionadas con objetivos de compromiso, relaciones con familiares o influencias sociales por el perfil a no ser que hayan sido previstas por el programador tratando de establecer retardos de tiempo o movimientos que simulen estas circunstancias concretas.

Actualmente se tiene una información bastante precisa acerca de los valores de velocidad de cada usuario, incluyendo la velocidad de personas de colectivos vulnerables como personas con discapacidad motórica, visual o personas con movilidad reducida [177]

Tabla 22: Valores de referencia en la evacuación de personas con limitaciones

	Adulto	Discapacidad temporal	Discapacidad motórica parcial	Movilidad reducida	Disc. motórica Dependiente	Disc. motórica Autónoma	Disc. visual Bastón guía	Disc. visual. Perro guía.
Ocupación en marcha [m²]	0,42	0,96	1,12	0,56	1,60	1,12	1,35	1,44 m ²
Velocidad horizontal [m/s]	1,5	0,6	0,6	0,6	0,8	1,0	0,8	0,8
Ascendente rampa [m/s]	1,3	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,8	0,8
Descendente rampa [m/s]	1,7	0,5	0,5	0,5	0,7	1,0	0,8	0,8
Ascendente escalera [m/s]	1,0	-	-	-	-	-	0,8	0,8
Descendente escalera [m/s]	1,5	-	-	-	-	-	0,8	0,8

En el caso del tiempo que hemos denominado pre-evacuación, actualmente no puede simularse mediante inteligencia artificial debido a la complejidad, dada la gran cantidad de variables que interactúan y, por tanto, la falta de datos que deben ser previstas de antemano por parte del programador según su entender.

7. Proceso de toma de decisiones

Las investigaciones que se han realizado acerca del comportamiento humano han demostrado que cualquier acción que toma una persona en una determinada situación es el resultado de una cadena de decisiones previas [178], por lo que dicha acción no es producto del azar o de una respuesta inmediata ante un estímulo.

En referencias anteriores se ha establecido que los individuos, cuando realizan una acción, es debido a un estímulo o un indicio que perciben. Una vez se analiza el indicio, interpretan la situación y valoran la amenaza y posteriormente, toman una decisión e inician la acción en base a toda la información recibida e interpretada. Por tanto, se puede deducir que existen 4 fases por cada indicio [179].

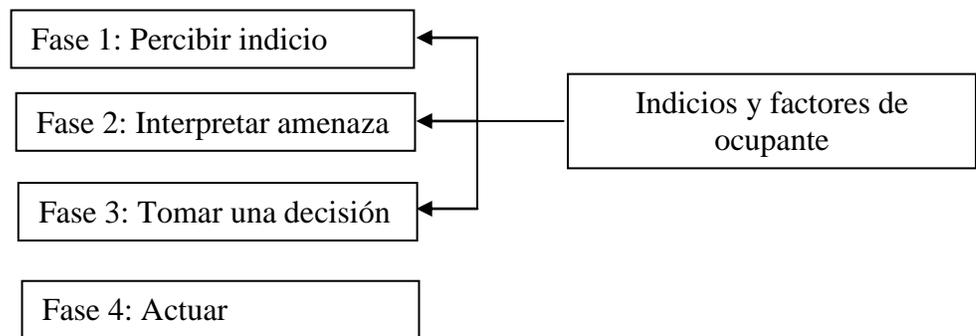


Figura 30: Proceso de toma de decisiones

En el caso de la emergencia de incendio en un edificio, los indicios son los que se van generando en el desarrollo del incendio y los factores son los que integran el perfil y las características de cada persona.

Según expone Kuligowski [180] en la fase de percepción o fase 1, del proceso de comportamiento, los ocupantes de los edificios pueden percibir todo tipo de indicios, tanto físicos como sociales. Los indicios físicos pueden ser las llamas, el humo, el sonido de la alarma, el calor e incluso la caída de escombros⁷⁹ e indicios sociales cuando se observa la conducta del resto de los ocupantes tanto por acción como por inacción, recepción de llamadas o escuchar comentarios. Además, durante esta fase, los ocupantes pueden percibir circunstancias más complejas, como la incertidumbre, la sobreexposición a la información, la ansiedad generada por la falta de tiempo e incluso pensamientos o recuerdos de otros sucesos vividos.

En la fase de interpretación o la fase 2, el ocupante trata de interpretar la información recibida a través de los indicios que pueden ser más o menos concluyentes, proporcionada por las señales percibidas durante la fase de percepción [181].

La toma de decisiones o fase 3 del proceso implica que los ocupantes concluyen acerca de qué deben hacer basándose en los indicios, los factores que influyen en su propio perfil, la propia amenaza y los riesgos que supone tomar dicha decisión [182].

Este proceso se inicia cuando los ocupantes reciben de manera individual el primer indicio que no corresponde con la rutina diaria y evoluciona con cada nueva información o indicio que recibe, por lo que se produce un proceso iterativo. Por lo tanto, cada acción emprendida está influida por este proceso. Entre los factores personales que tienen influencia en el proceso de toma de decisiones destacan los siguientes [180]:

⁷⁹ Véase Tabla 14

- Factores que influyen en si el individuo percibe o no el indicio
- Factores que influyen en el tipo de interpretación que el individuo hace de la situación y la toma en consideración de la amenaza
- Factores que influyen en la decisión sobre una acción.

7.1. Protective Action Decision Model. PADM

El actual modelo para el análisis del comportamiento humano en incendios se denomina Protective Action Decision Model o PADM [183]. Es un modelo multifase basado en las conclusiones de las investigaciones sobre la respuesta de los individuos a situaciones de amenaza [184]. El PADM integra el procesamiento de la información de señales e indicios sociales [185] y ambientales. El PADM identifica tres procesos críticos, que continuando con el proceso iterativo de toma de decisiones, se pueden denominar: recepción, atención y comprensión.

Este modelo describe la sucesión de la toma de decisiones y cómo las propias decisiones influyen y, a su vez, son influidas por factores que se van sucediendo a lo largo de todo el proceso, [186], [23], [25].

El PADM tiene en cuenta cualquier variable o factor que pueda afectar durante la evacuación de la persona. Estas variables o factores pueden ser tanto cuantitativos como cualitativos. Las variables cualitativas son las que tienen influencia social [187], así como la comunicación social [188] e información que recibe el usuario [71].

Si el usuario con los indicios que percibe decide que no tiene suficiente información, buscará nuevos indicios. Los indicios deben responder preguntas tan relevantes como el riesgo real que supone el propio indicio, o si el resto de las personas que comparten el espacio son conscientes de la amenaza o riesgo que está evaluando. Esto es más complejo cuando existen muy diferentes perfiles dentro del mismo local o edificio, ya que la forma de comunicarse puede ser totalmente diferente. [188].

Se debe considerar el PADM como un proceso de toma de decisiones en el que la persona que recibe la información puede tener una conducta errática o contraria a sus propios intereses, es decir, en caso de emergencia de incendio, no tiene por qué ser un proceso que lleve al éxito de la evacuación. Esto se debe a que el usuario tiene cierta información que se va sucediendo a lo largo de todo el proceso, pero por lo general, no podrá disponer de toda la información necesaria que requiere tomar la decisión correcta [189].

La situación ideal es poder disponer tanto de la información como del tiempo necesario, lo que haría que las personas más racionales pudieran llegar a conclusiones válidas, pero durante la evacuación, además de no poder disponer de toda la información y del tiempo necesario [190], aparecerán nuevos factores como el estrés, la ansiedad o el miedo que también tendrán una influencia esencial durante la evacuación [191], [192]. También se han elaborado estudios [82] para describir el proceso de la toma de decisiones en una situación límite o de emergencia en el que influyen aspectos como la confianza o el conflicto de intereses.

Los estudios hasta ahora reflejan que, a pesar de los indicios y la información, las personas que viven la experiencia de un incendio sin experiencia previa suelen tomar

decisiones incorrectas. Esto se debe a que el individuo juzga de manera rápida y sin criterio real la situación que está viviendo, utilizando atajos en el pensamiento que le hacen llegar a conclusiones erróneas [193]. La inexperiencia y la incertidumbre son factores que juegan en contra del éxito individual de la evacuación, algo que puede acarrear aún peores consecuencias cuando la persona que toma las decisiones erróneas es el líder de un determinado grupo, lo que obliga a las personas seguidoras a cometer el mismo error. Este factor fue estudiado por Mileti y Sorensen [194] consiste en que hay individuos que, además de ser receptores de indicios, también son capaces de generarlos.

En otras ocasiones, como ya se ha valorado anteriormente, el usuario puede recibir una advertencia que considere exagerada o poco probable y requiera una confirmación o contrastar la información.

El PADM integra el procesamiento de información que aparece en modo de indicios o pistas tanto de tipo social como de entorno. Se identifican tres fases que pueden denominarse percepción, interpretación y decisión, con una cuarta que sería la actuación y que recoge las tres anteriores. Estas tres fases van sucediéndose a lo largo de todo el proceso introduciendo indicios o variables que van adecuando su conducta. Estas variables, como se vio anteriormente son propias del entorno, del desarrollo del incendio y del perfil del usuario [3].

Tabla 23: Factores que influyen en la toma de decisiones

	Usuario		Edificio		Incendio	
Perfil	Sexo	Uso	Administrativo	Visual	Llamas	
	Cultura		Aparcamiento		Humo	
	Edad		Comercial		Luz	
	Habilidad		Docente	Olfativo	Incendio	
Conocimiento	Familiaridad		Hospitalario		Humo	
	Experiencia		Residencial P.	Audible	Agrietamiento	
	Entrenamiento		Residencial		Cristales	
Influencia	Grupo		Industrial		Objetos	
Externa	Personalidad	Distribución	Nº de plantas	Calor	Paredes	
			Objetivo		Superficie/Planta	Puertas
			Rol		Salidas	
			Escaleras			
			Orientación			
			Sector incendio			
			Acceso			
			bomberos			
			Zona refugio			
			Actividad	Comercial		
				Hospedería		
				Hostelería		
				Deportivo		
				Religioso		
				Espectáculo		
		Serv. terciarios				
	Instalaciones	Alarma				
		Comunicación				
		Plan evacuación				
		E.A.E				

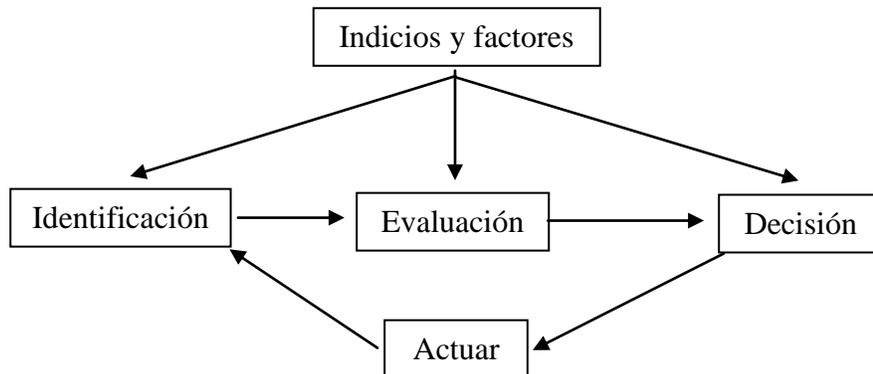


Figura 31: Proceso iterativo de toma de decisiones.

El PADM describe el flujo de información del proceso iterativo de toma de decisiones basada en indicios, y la decisión que se toma con cada uno de estos indicios, provocando las acciones.

Estos indicios son percibidos por el individuo de forma individual según su perfil.

Por ejemplo, si una persona tiene una discapacidad sensorial y tiene problemas de audición, esta característica personal tiene una influencia directa acerca de cómo va a recibir la información [15] tanto de las comunicaciones automatizadas como de las que recibe por parte de los miembros del EAE. Por ejemplo, si una persona tiene discapacidad motórica, sus decisiones estarán afectadas por su percepción del peligro en función del tiempo que calcula para su propia evacuación [177]. Como ejemplo de cómo interaccionan e influyen unos factores con otros, se puede entender que el olor a humo en una estancia donde habitualmente no debe haberlo, por ejemplo, en un dormitorio, es un indicio más evidente que el mismo olor en una cocina.

De este modo, la introducción de indicios en el proceso de la toma de decisiones comienza con una fase en la que el individuo recibe la señal o indicio, el propio individuo debe prestarle atención y debe sacar conclusiones y comprender qué información aporta dicho indicio.

Un mensaje de evacuación en un edificio donde la megafonía es de mala calidad puede captar la atención de los usuarios, pero no podrán comprender la información [27].

El PADM clasifica la percepción de los mensajes en tres grupos: las percepciones en *amenazados*, en *protectores* y en los que implican a *partes interesadas* [195].

En el primer grupo, amenazados, esta percepción sugiere al individuo un cambio de actitud de una tarea cotidiana que puede ser desde la interrupción de un trayecto para ir a la compra o al trabajo hasta pensamientos que llevan a graves daños e incluso la muerte.

Estas amenazas graves las asocian de manera casi inmediata las personas que habitualmente piensan o hablan de accidentes, amenazas globales tienden a interpretar que cualquier indicio en este sentido puede ser un desastre.

El segundo grupo que percibe los indicios son los protectores. En este grupo, el individuo se prepara para afrontar el indicio que ha percibido. Esta preparación puede tener diversos niveles de compromiso y preparación, desde individuos que no hacen nada por creer que cualquier acción es innecesaria, hasta individuos que se toman en serio todas las medidas que pueden estar a su alcance, tanto dentro de su propia residencia como en los lugares de trabajo.

El tercer grupo, partes interesadas, sería el que implica a la persona individualmente en referencia a amenazas y medidas a adoptar para terceras personas. La percepción en relación con terceras personas, que pueden denominarse también stakeholders, es propia de los responsables de los cuerpos de seguridad, los responsables de la administración dentro de su ámbito de competencias, los responsables de la seguridad de los edificios, los investigadores e incluso los empresarios, tal como se planteaba en la Ley de Prevención de Riesgos Laborales⁸⁰.

En este grupo es importante comprender cómo la ciudadanía en general, percibe a su vez a los responsables de tomar las decisiones en función de tres factores: su experiencia en materia de desastres, que en este estudio sería el caso de los incendios, su fiabilidad como profesionales y su responsabilidad dentro de la jerarquía de mando que se plantea. Esta percepción se comprende mejor en desastres naturales como una inundación o un terremoto, pero podría aplicarse a los incendios en los casos en que, los ocupantes de los edificios desconfían de la información de alerta proporcionada por los responsables del edificio [113].

Dependiendo del perfil de cada persona, esta puede percibir el indicio de distinta manera, según su experiencia previa en desastres y amenazas o conocimiento concreto de una actividad.

Estas tres formas de percibir los indicios son decisivas para el proceso de toma de decisiones posterior. El modelo de toma de decisiones, una vez clasificado el tipo de receptor continua con una batería de 5 preguntas que se hace la propia persona en relación con el

⁸⁰ Artículo 20: Medidas de emergencia. Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales.

indicio y que a su vez requieren más información, según se expone a continuación: [195], [188].

1. ¿Hay alguna amenaza real a la que deba prestar atención?

Si la respuesta es afirmativa, el individuo cree la amenaza

2. ¿Necesito tomar medidas de protección?

Si la respuesta es afirmativa, el individuo decide que necesita tomar medidas de protección

3. ¿Qué hacer para lograr la protección?

El individuo comienza a buscar estrategias para conseguir la protección

4. ¿Cuál es el mejor método de protección?

El individuo elige una de las estrategias de acción desarrolladas en la etapa anterior y desarrolla una estrategia o plan de acción de protección

5. ¿Es necesario tomar medidas de protección ahora?

En caso afirmativo, el individuo sigue el plan desarrollado en la etapa anterior

Los individuos que perciben una amenaza deben responder a cada una de las anteriores 5 preguntas a través de la secuencia perceptivo-conductual, en la que el resultado del proceso es la realización de una acción.

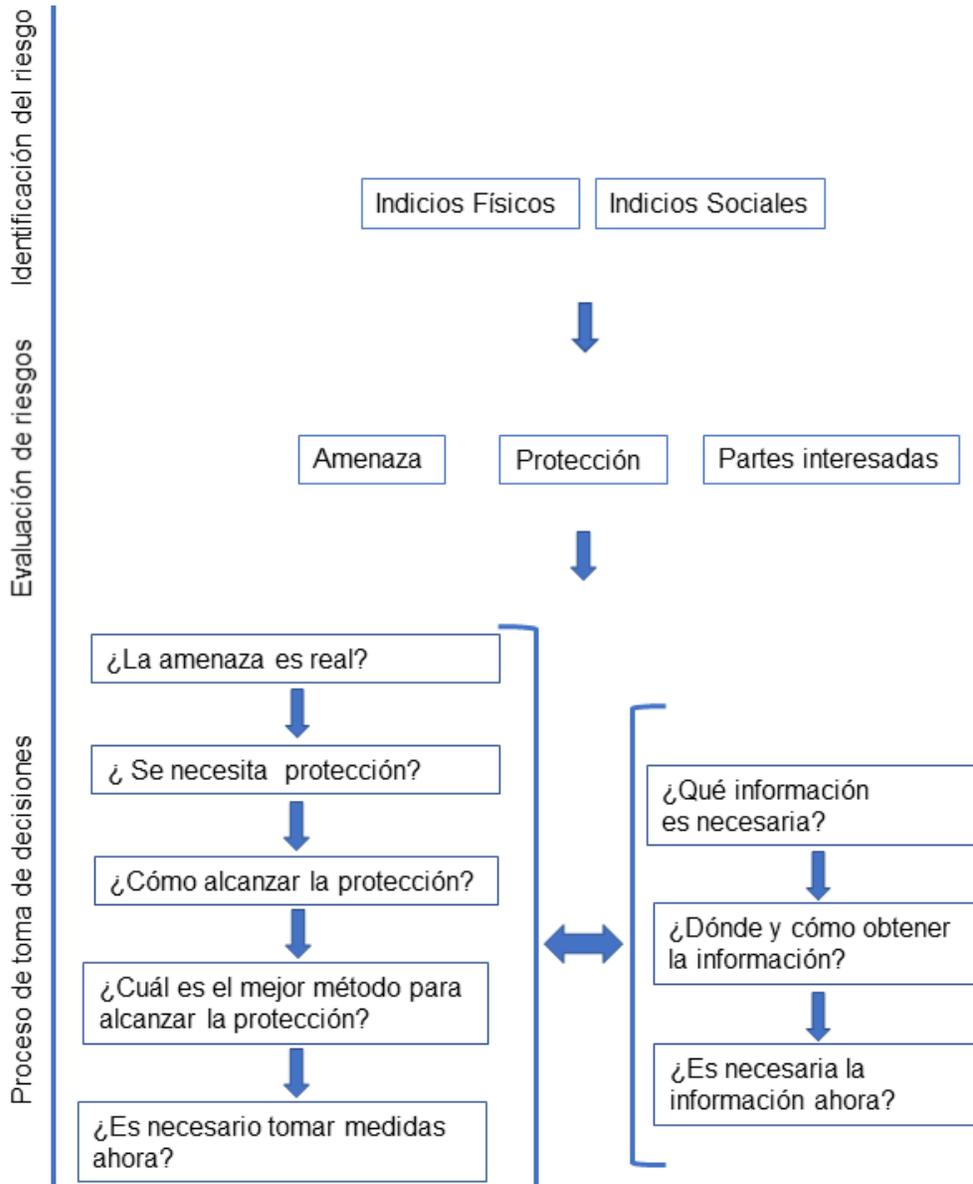


Figura 32. Proceso de toma de decisiones en situación de amenaza.

La respuesta a las diferentes preguntas que se plantean durante el proceso de toma de decisiones a veces no es sencilla. En cada una de las fases puede haber incertidumbre y, por tanto, no tener una respuesta segura ni inmediata. Esto implica un intervalo de tiempo que debe dedicarse a la búsqueda complementaria de información.

El tiempo dedicado a la búsqueda de información será mayor, cuanto más tiempo intuya el usuario que dispone para tomar decisiones. Cuando el usuario cree que tiene la información necesaria para responder una de las preguntas planteadas, pasa a la siguiente y comienza de nuevo el proceso de búsqueda de respuesta. [195]

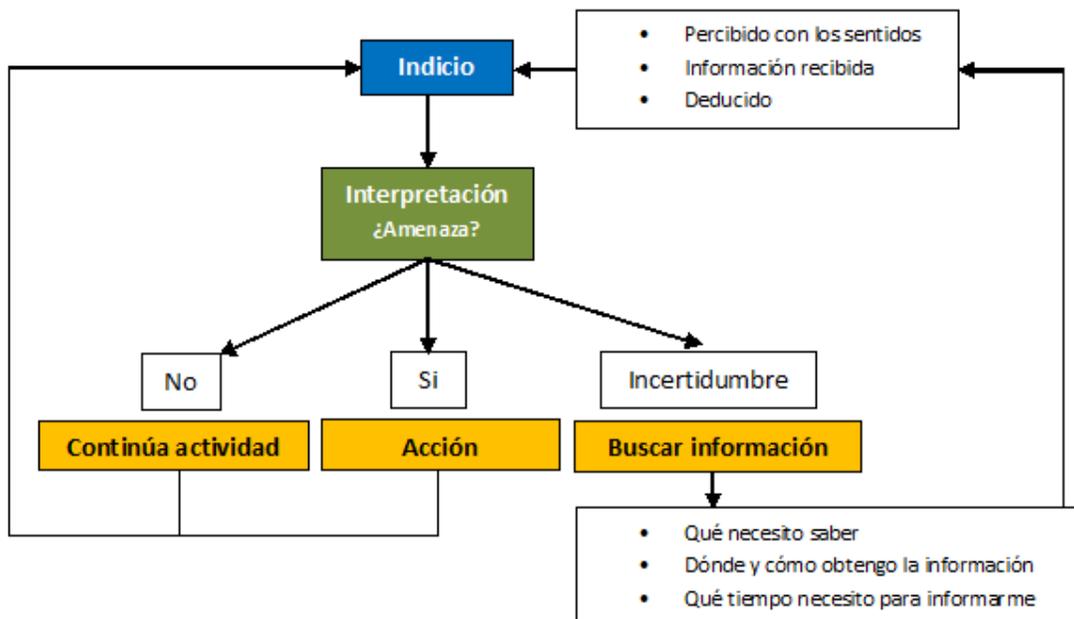


Figura 33. Proceso de toma de decisiones en un incendio.

8. La Realidad Virtual

El estudio del comportamiento humano en caso de incendio, tal como se ha ido introduciendo, tiene una particular mezcla multidisciplinar⁸¹ en el que actualmente tienen cabida ingenieros, arquitectos, sociólogos, desarrolladores informáticos o bomberos como cuerpo con mayor experiencia en campo.

El principal problema es que no hay una metodología para la captura y registro de datos que sea fiable [172], [196], [197] en el sentido de que, o bien la información viene de encuestas y cuestionarios, lo que implica subjetividad, o bien proviene de la observación directa, pero en ningún caso podrá ser de una experiencia real, puesto que los incendios no pueden reproducirse. Por ello, la Realidad Virtual o RV es una alternativa segura en la que es posible reproducir un incendio sin consecuencias para los usuarios.

La Realidad Virtual es el uso de la tecnología informática para crear un entorno tridimensional inmersivo. En cierto modo, los laboratorios en el mundo real podrían considerarse entornos simulados, pero en este ámbito se utilizan únicamente medios informáticos. En el presente estudio, el entorno y la experiencia en general debe ser hiperrealista, por lo que solo es posible mediante un casco de Realidad Virtual y un equipo informático de alto rendimiento que pueda recrear no solo las imágenes de un edificio, sino también luces, sombras o texturas que faciliten al usuario creer que realmente está dentro de un entorno alternativo.

⁸¹ Simposio de Comportamiento Humano en caso de incendio. Cambridge 2012

Las primeras investigaciones en materia de comportamiento en la que se utilizó un dispositivo de Realidad Virtual, estuvieron enfocadas con fines terapéuticos para analizar las fobias. El objetivo [198] era examinar la eficacia de una exposición a la fobia de manera paulatina y graduada. Para ello se enfrentaba al paciente con su fobia, en el caso de estudio era la acrofobia o miedo a las alturas, siempre desde el lado de la seguridad.

Estos estudios se han ido desarrollando con otro tipo de patologías vinculadas con la psicología [199], [200] como el estrés postraumático.

La Realidad Virtual ayuda al investigador a acercarse al comportamiento y las reacciones de los usuarios que pudieran tener en un incendio. El participante sabe que está en un entorno virtual, lo que supone que en ningún caso serían las mismas reacciones que en un entorno real, pero si es posible registrar en tiempo real algunas conductas que el usuario realiza de modo espontáneo, pero debe estudiarse la relación entre la conducta en un entorno real y uno virtual [201] para poder hacer un contraste en los resultados obtenidos. En otros campos como es a conducción de vehículos se ha demostrado que los resultados de comportamiento entre el mundo real y virtual son muy similares [202]. En estudios de comportamiento humano en caso de incendio se han hecho algunos estudios cuyas conclusiones invitan a continuar con esta metodología [203] tanto en la validación de modelos de evacuación como en los entrenamientos. Los métodos para la captura y registro del comportamiento fueron expuestos anteriormente. A continuación se muestra una Tabla 24 una comparativa con 6 técnicas de obtención de datos de comportamiento en caso de incendio en la que se pueden ver algunas de las fortalezas y debilidades de cada uno de los métodos. [204]

Tabla 24. Estudio del comportamiento humano en incendios: Comparativa de metodologías

Técnica	Caso	Tipo de dato	Tiempo real	Datos in situ	Conocimiento del incendio	Coste
Cuestionario	Real	Subjetivo	No	No	Sí	Bajo
Encuesta	Ficticio	Subjetivo	No	No	Sí	Medio
Observación laboratorio	Ficticio	Objetivo	Limitado	Limitado	Sí	Alto
Observación simulacro	Real	Objetivo	Limitado	Limitado	Sí	Alto
Simulador	Ficticio	Subjetivo	Sí	Sí	No	Bajo
Realidad Virtual	Real	Objetivo	Sí	Sí	No	Bajo

Nota: El coste incluye la posibilidad de réplica

La Realidad Virtual es una herramienta que permite al investigador estar presente, no sólo en los momentos decisivos en la toma de decisiones del usuario, sino mucho antes y después. Si el investigador conoce el comportamiento de una persona en un momento en el que no hay amenazas, es posible comparar los cambios de actitud y entender mejor la conducta en momentos en los que tiene que evitar una amenaza.

9. Protocolo

La hipótesis principal de esta investigación es la posibilidad de captar y registrar el comportamiento de una persona en toda la fase de evacuación que comprende, tanto la fase de pre-evacuación como la fase de desplazamiento hasta una zona segura mediante un dispositivo de Realidad Virtual.

Para poder captar y registrar estos datos de comportamiento es necesario validar un protocolo que exponga, de manera genérica el proceso de diseño e implantación del sistema virtual.

El protocolo se divide en tres fases: configuración del sistema, del usuario y de la simulación virtual.

- Primera fase o configuración del sistema en la que se establece un criterio general para el diseño del entorno virtual en el que se incluye el edificio y la misión.

Se denomina edificio al escenario o entorno virtual inmersivo dentro del cual el usuario puede desplazarse libremente. En el diseño del edificio se incluye señalización, alarma y personas virtuales.

Se denomina intervalo de la misión o misión, al intervalo de tiempo en el que el usuario está inmerso en el escenario virtual. Para la misión, el protocolo establece el proceso de aprendizaje de movimientos y adaptación al entorno virtual, un objetivo concreto que debe cumplir el usuario y el diseño del incendio.

- Segunda fase o configuración de usuario en la que se establecen las características o perfil de usuario y el procedimiento que seguirá el usuario
- Tercera fase, en la que se establece un criterio general para la captación y registro de datos durante la experiencia de usuario. En esta fase del protocolo, se identifica el procedimiento para llevar a cabo la captura y registro de datos.

Los datos se recogen, por un lado, mediante dos cuestionarios que se realizan antes y después de la misión para identificar el perfil del usuario y por otro, mediante un

dispositivo de Realidad Virtual que registra en tiempo real las variables de comportamiento.

El protocolo establece además qué recursos materiales y humanos son necesarios para que se puedan registrar los datos con éxito.

9.1. Proceso de diseño del protocolo. Premisas iniciales.

Antes de iniciar el diseño del protocolo se analizaron y establecieron como preámbulo unas premisas de partida que debían ser la base a partir de la cual se diseñará el conjunto.

- Experiencia sencilla e intuitiva

Las actuales propuestas de Realidad Virtual están presentes en los juegos y en diferentes campos profesionales como la medicina, la ingeniería, el comercio o el turismo. La Realidad Virtual es un ámbito de la tecnología que está al alcance de casi todos, pero hasta la fecha no tiene un arraigo generalizado y es una tecnología desconocida para una buena parte de la población.

El protocolo por tanto, debe tener en cuenta un espectro de población muy variado, en el que hay usuarios conocedores de esta tecnología que juzgan de antemano la experiencia en contraste con anteriores experiencias o usuarios con ninguna experiencia lo que implica sencillez e intuición de los controles

- Uso de la gamificación

El término gamificación se refiere a la técnica de aprendizaje basada en el juego. En este caso, la gamificación es un aliciente para que el usuario realice una experiencia válida

- Movimientos

Con el fin de que el desplazamiento sea lo más realista posible dentro de las limitaciones de los dispositivos de Realidad Virtual, la opción seleccionada es una plataforma cóncava que interpreta de manera gradual el movimiento real de los pies presionando o girando la citada plataforma.

- Objetivo de usuario

La experiencia proporciona un objetivo realista y alcanzable a cumplir por el usuario, evitando que pueda tener una actitud no deseada que invalide los datos registrados.

- Adaptable

El diseño de la experiencia está enfocado a un escenario y un incendio concretos, pero no así el protocolo, que puede prever infinitos casos, incluso en otros ámbitos de la emergencia.

- Sin información del incendio

Con el objetivo de poder registrar datos de comportamiento similares a un incendio real en la fase de pre-evacuación, los usuarios no tienen información previa acerca del incendio dentro del entorno virtual.

- Sin sistema de guiado.

En los juegos comerciales de Realidad Virtual en los que el usuario es un avatar que puede desplazarse libremente por el entorno, es habitual disponer de un sistema de guiado mediante flechas que indican la dirección del objetivo. En este caso, el usuario debe guiarse únicamente utilizando la señalización del edificio, tal como ocurriría en un escenario real.

- Uso del edificio

El escenario elegido es un edificio de uso administrativo. La elección viene dada por ser un edificio en el que es sencillo establecer una misión para el usuario y en la que puede participar cualquier tipo de perfil.

9.2. Metodología y herramientas

La metodología de trabajo está basada en una aproximación híbrida mediante el uso de medidas experimentales y la generación de entornos virtuales simulados mediante un ordenador, un dispositivo de Realidad Virtual o RV y se complementa con un sensor de frecuencia cardíaca o pulsómetro.

El emisor-receptor de datos elegido para recrear la simulación virtual, así como los dispositivos complementarios, se relacionan en las especificaciones de hardware de la Tabla 25. [205], [206], [207]

Tabla 25: Especificaciones de los dispositivos

HTC VIVE Series Sistema RV	Ordenador	3drudder Control movimiento	Polar Pulsómetro
Sistema de rastreo VR	Intel Core i7	360°	Óptico
G-sensor (acelerómetro)	16 Gb RAM	Rotación	Bluetooth
Giróscopo	Gráfica GTX 1070	Manos libres	ANT+™
Proximidad	Windows® 10	Progresivo	
Área seguimiento, 15m2			
Micrófono integrado			
Trackpad multifunción			



Figura 34. Dispositivo HTC de Realidad Virtual.



Figura 35. Plataforma 3drudder.

El método descrito en este estudio es posible siempre y cuando se disponga de los dispositivos descritos o superiores, así como el software que debe desarrollarse ad hoc en cada uno de los casos que se desee estudiar. Por tanto, la metodología se adapta a cada caso, pero el software debe ser el apropiado para los datos de comportamiento que se deseen analizar.

El protocolo que a continuación se describe expone, paso a paso, los puntos que deben tenerse en cuenta en el desarrollo de un caso de incendio en un entorno virtual.

A continuación se relacionan los parámetros que se capturan mediante los dispositivos, tanto de Realidad Virtual como de pulsómetro.

- *Tiempo de reconocimiento*: Intervalo que transcurre desde el inicio de la señal de alarma hasta que el usuario interpreta que hay una emergencia real.
- *Tiempo de respuesta*: Intervalo que se inicia con el tiempo de reconocimiento hasta el inicio del traslado para evacuar el edificio.
- *Tiempo de desplazamiento*: Intervalo que comprende desde el inicio del traslado hasta el acceso a un lugar seguro.
- *Tiempo de pre-evacuación*: Intervalo de tiempo de reconocimiento sumado al tiempo de respuesta
- *Tiempo de evacuación*: Intervalo de tiempo de reconocimiento sumado tiempo de respuesta añadido al tiempo de desplazamiento
- *Tiempo disponible seguro o tiempo límite*: Intervalo de tiempo desde la señal de alarma hasta el límite en el que la evacuación se hace inviable.
- *Trayectoria*: Recorrido completo desde el momento en que se activa la señal acústica y visual de la alarma hasta el final de la misión, identificando el recorrido en coordenadas bidimensionales.
- Velocidad en cada punto de la trayectoria, incluidos los lugares donde el usuario se agacha o se pone en cuclillas debido a los efectos del humo durante la evacuación.

- Visualización de las señales de emergencia, detectando qué señales son vistas por el usuario durante el desplazamiento hasta la zona de seguridad.
- Movimientos bruscos de la cabeza.
- Frecuencia cardíaca.

Los datos registrados de frecuencia cardíaca y movimientos bruscos de cabeza abarcan todo el intervalo de tiempo de la misión, con el objetivo de poder contrastar los datos antes de y después del sonido de la alarma.

En el caso de los tiempos y trayectoria, se registran los datos en el intervalo desde que suena la alarma hasta el final de la misión.

El diseño del protocolo completo, incluyendo edificio, incendio y registro de datos consta de siete pasos.

Paso 1: Identificación y clasificación del perfil de usuario.

En primer lugar, se asigna al usuario una codificación individual y se identifican características de su perfil mediante un cuestionario.

- Edad
- Sexo
- Discapacidad
- Nivel de educación

Paso 2: Enumerar las variables de comportamiento que se captan y registran mediante los dispositivos. A continuación, se hace una relación de las variables de comportamiento y los datos registrados

Tabla 26. Variables de comportamiento identificadas en el protocolo

Variables de comportamiento	Dato registrado
1. Tiempos registrados.	<p>Tiempo de reconocimiento o intervalo que transcurre desde el inicio de la señal de alarma hasta que el usuario interpreta que hay una emergencia real.</p> <p>Tiempo de respuesta o intervalo que se inicia con el tiempo de reconocimiento hasta el inicio del traslado para evacuar el edificio.</p> <p>Tiempo de desplazamiento o intervalo que comprende desde el inicio del traslado hasta el acceso a un lugar seguro.</p>
2. Recorrido de evacuación	<p>Trayectoria en el intervalo del tiempo de evacuación</p> <p>Selección de salida de emergencia</p> <p>Trayectoria en el intervalo de tiempo gateando o agachado</p>
3. Velocidad de desplazamiento	Intervalo de velocidades asignadas por perfil
4. Visualización de la señalización.	Señales visualizadas por el usuario durante la evacuación
5. Nivel de atención	Movimientos bruscos de cabeza antes y durante la fase de evacuación
6. Variable fisiológica	Frecuencia cardíaca durante toda la experiencia. Registro cada segundo
7. Acciones	Apertura y cierre de puertas

Los datos sobre el comportamiento se capturan y registran en tiempo real a través del dispositivo de realidad virtual.

Paso 3. Diseño del escenario y condiciones del incendio

El diseño del edificio y el incendio condicionan el comportamiento del usuario y deben estar adaptados a los perfiles que se desean analizar. Para el análisis del comportamiento

personas menores de edad, no es interesante diseñar un edificio de uso industrial, sin embargo, sí es interesante un edificio de uso comercial.

El diseño del edificio incluye la señalización habitual para guiarse dentro del escenario, incluyendo la correspondiente a las salidas de emergencia.

En el caso de estudio se escogió un edificio de uso administrativo. El diseño del edificio corresponde con un edificio existente que cumple con el Código Técnico de la Edificación.



Figura 36. Captura de pantalla, entrada del edificio.



Figura 37. Captura de pantalla, primera planta.



Figura 38. Captura de pantalla, salida de emergencia.

Debe incluirse un número predeterminado de personajes virtuales que pueden interactuar con el usuario realizando funciones de comunicación y asistencia en el proceso de evacuación.

En el caso de estudio, se incluye un vigilante en la entrada del edificio que da instrucciones al usuario acerca del objetivo que debe cumplir e indica al usuario los movimientos básicos, tales como desplazarse, agacharse o girar.

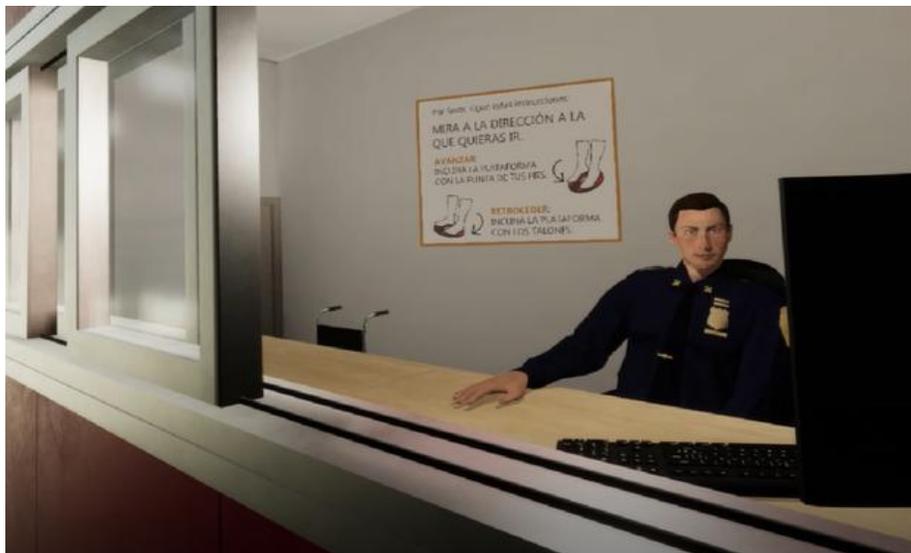


Figura 39. Captura de pantalla, vigilante.

También aparece durante el incendio un miembro del Equipo de Alarma y Evacuación en la zona inundada de humo, indicando dos posibilidades de manera aleatoria.

1. Mensaje para evacuar inmediatamente el edificio como refuerzo a la señal de alarma
2. Mensaje contrario a la evacuación, indicando que no hay una emergencia real en el edificio



Figura 40. Capturas de pantalla del Equipo de Alarma y Evacuación.

Paso 4. Diseñar el escenario de incendio.

El diseño del incendio debe contemplar la dinámica del incendio y sus consecuencias.

Para ello debe tenerse en cuenta los siguientes datos:

- Punto de inicio del incendio
- Velocidad de propagación según el diseño interior, los materiales de construcción y la protección pasiva
- Distancia mínima a la que el humo y las llamas afectan al usuario
- Estratificación del humo
- Coeficiente de extinción o medida en que el humo absorbe la luz
- Distorsión de la visibilidad por irritación ocular
- Tipo de alarma como la frecuencia o el volumen
- Señales de comunicación hablada



Figura 41. Capturas de pantalla del incendio.



Figura 42. Simulación de la visualización del incendio.

Para la validación del modelo del incendio en cuanto a movimiento de humo, estratificación, coeficiente de extinción, iluminación de las llamas y sonidos habituales en los incendios se solicitó la colaboración de bomberos expertos de la Asociación Profesional de Técnicos de Bomberos.



Figura 43. Pruebas y validación de bomberos.

Paso 5. Fijar un objetivo de usuario

El objetivo de usuario debe diseñarse teniendo en cuenta que debe cumplir las siguientes premisas

- Determinar los puntos de partida y finalización de la trayectoria previa al aviso de alarma. De este modo, se establece un tiempo y longitud de trayecto adecuado para el periodo de adaptación.
- Evita que el usuario consuma su tiempo de experiencia en zonas del edificio que no aportan datos de comportamiento.
- Permite analizar, dentro de las características del usuario, el grado de compromiso para finalizar el objetivo
- El objetivo será único para todos los usuarios
- La ruta de acceso debe ser diferente a la ruta de evacuación.
- Ofrece al usuario un reto, de acuerdo con la idea de gamificación de la experiencia.

Para que el objetivo de usuario sea de interés, se propone un *serious game*, es decir, un juego que no está diseñado para la diversión sino para el aprendizaje o el entrenamiento. Se tiene en cuenta para ello la teoría del flujo en gamificación.

Según la teoría de flujo [208], en la actividad dentro del juego debe existir un equilibrio. Por un lado, debe suponer un desafío o un reto para el usuario, con una cierta dificultad para que este no se aburra y por otro lado, no debe ser demasiado complejo para evitar generar en la persona que participa ansiedad o frustración.

En el caso de estudio, el objetivo es la recogida de un paquete ficticio en un despacho determinado del edificio de uso administrativo. Para llegar al despacho, el usuario debe tener en cuenta únicamente la señalización del edificio, tal como sería en un caso real. Asimismo, no recibe ayuda ni información adicional durante la experiencia. El usuario debe ascender a la primera planta del edificio en ascensor, por lo que la evacuación deberá hacerla por las escaleras, ya que los ascensores quedarán bloqueados tras la señal de alarma. El segundo reto que se propone al usuario es conseguir llegar hasta una zona segura una vez suena la alarma del incendio de la que no tenía previo aviso. Durante el recorrido de evacuación, un avatar del Equipo de Alarma y Evacuación dará instrucciones al usuario, que aleatoriamente pueden ser correctas o ser confusas, de tal manera que el usuario debe tomar la decisión de orientarse o no con esa información.

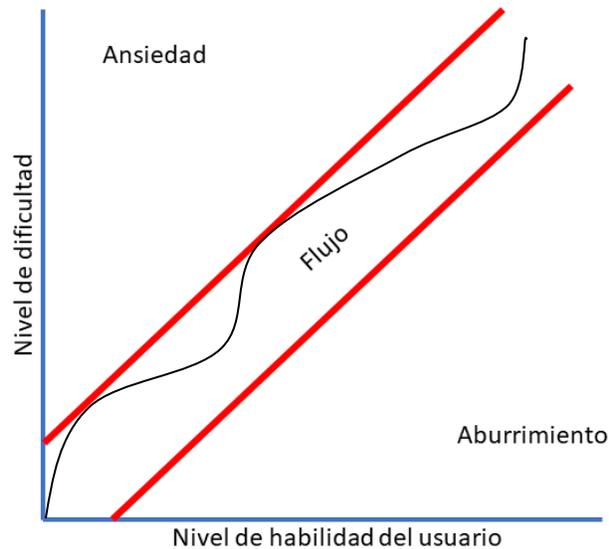


Figura 44 Representación de la teoría del flujo.

Paso 6. Nivel ansiedad rasgo y estado del usuario.

El usuario contestará un cuestionario antes de la misión y otro después de la misión que determinará si ha habido un incremento en el nivel de ansiedad del participante.

El nivel ansiedad rasgo es una característica de personalidad que cuantifica el estado emocional medio de una persona a lo largo del tiempo. En contraste con el nivel de ansiedad rasgo, se define el nivel de ansiedad estado como el estado emocional en un determinado instante. En el estudio se contrastan ambos niveles.

El nivel de ansiedad rasgo y ansiedad estado se pueden valorar mediante la prueba STAI⁸² [209], [210], [211]. Esta prueba es un instrumento que cuantifica la ansiedad de los adultos (también está disponible una versión para niños). Este instrumento en particular se

⁸² State-Trait Anxiety Inventory

utiliza para simplificar la separación entre la ansiedad de estado y la ansiedad de rasgo y los sentimientos de ansiedad.

En el caso de estudio, se simplificó el test reduciendo el número de preguntas, dado que el objetivo era comprobar si había una variación y no tanto en qué medida se había producido esa variación.

En el cuestionario final, también se pregunta si el usuario ha tenido experiencia en casos reales de incendios.

Paso 7. Procedimiento para la experiencia de usuario

- Identificación de usuario y creación de su perfil como se establece en el paso 1.
- Se proporciona la información necesaria para llevar a cabo la misión, es decir, nociones básicas de movimientos dentro del entorno virtual y el objetivo a cumplir en un tiempo determinado. En la información que se proporciona no se menciona la posibilidad de que pueda haber un incendio.
- Se colocan en el usuario el casco de Realidad Virtual con una inmersión visual y auditiva y pulsómetro, y se le ajustan los pies a la plataforma de desplazamiento.
- El equipo se calibró antes de cada experiencia de usuario. El grupo de investigación calibró el dispositivo y supervisó el 100% de las experiencias.
- Al iniciarse la inmersión en el entorno virtual, un personaje o avatar recuerda las nociones básicas de movimiento y le invita a seguir un breve tutorial de aprendizaje. El personaje virtual también recuerda al usuario la misión que debe cumplir a su vez,

- Una vez que el usuario comienza su objetivo, tendrá una inmersión total y ya tendrá que valerse por sí mismo sin ayuda exterior ni señalización virtual que no sea propia del escenario para localizar ir al punto indicado.
- Si el usuario experimenta algún tipo de mareo o incomodidad, debe detenerse inmediatamente la experiencia y se descartan los datos registrados.



Figura 45. Experiencia de usuario.

La Realidad Virtual, al igual que otras experiencias puede producir una sensación desagradable de mareo, inestabilidad, sudores fríos y en casos extremos la pérdida de la consciencia.

Este efecto denominado cinetosis [212] se produce en algunas personas cuando no coinciden las señales de movimiento de la vista y el oído interno.

Como ejemplo, cuando una persona lee mientras viaja hay un desplazamiento, tiene la vista fijada en un punto sin movimiento mientras el oído interno detecta que hay movimiento.

En el caso de la Realidad Virtual es el efecto contrario, la vista indica al cerebro que hay movimiento y sin embargo, el oído interno no detecta movimiento ya que la experiencia se realiza en un espacio reducido determinado. Este malestar es transitorio y desaparece cuando vista y oído vuelven a coordinarse. En la figura 41 se expone el protocolo.

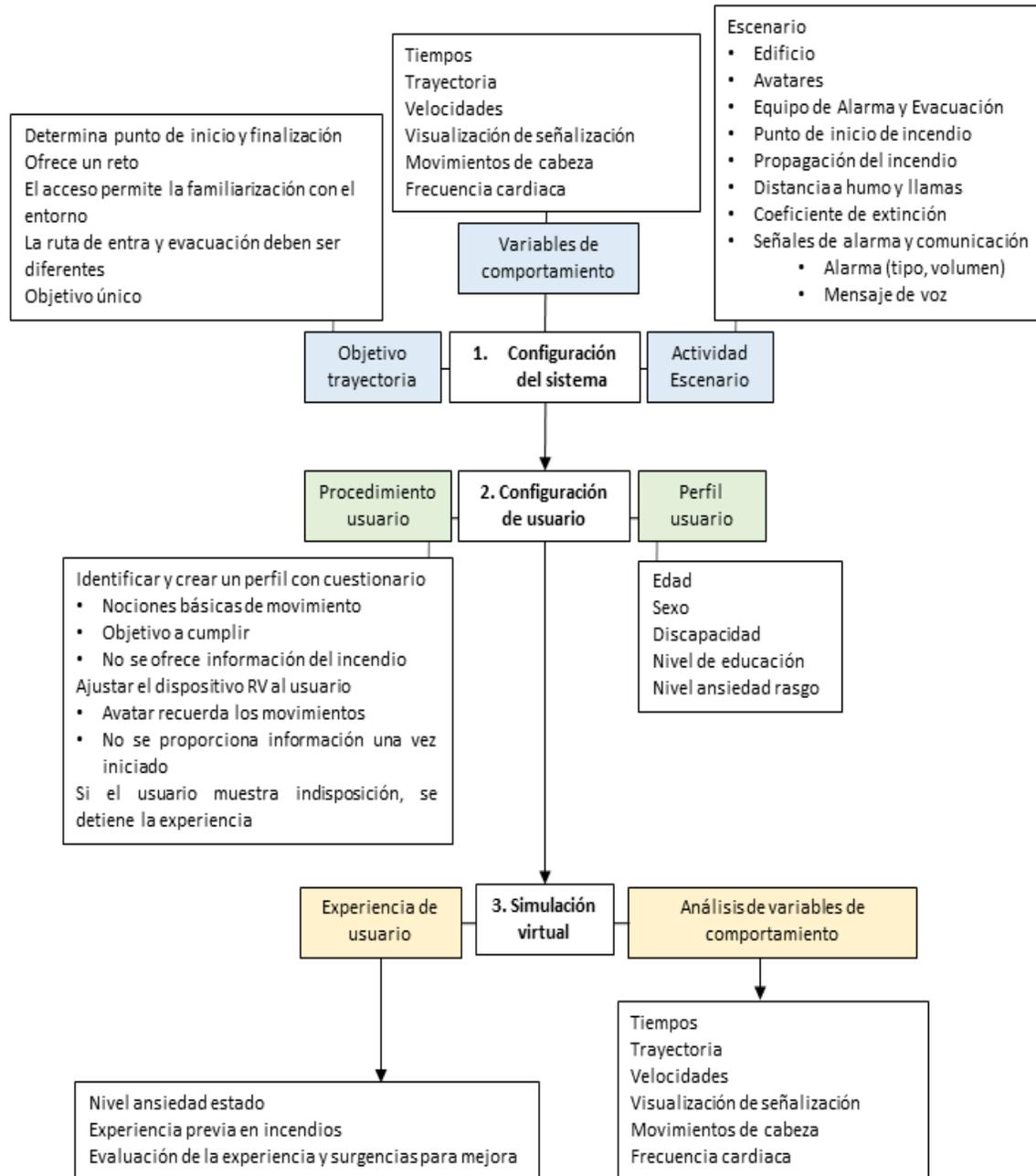


Figura 46. Esquema para la aplicación del protocolo.

10. Resultados

El protocolo se evaluó con un único entorno virtual en el que participaron 300 usuarios de diferentes perfiles. Las pruebas se realizaron en el contexto de la Semana de la Prevención de Incendios de Fundación Mapfre con la colaboración de APTB⁸³.

La participación de hombres y mujeres es similar debido a la elección de un formato lúdico y familiar en el que los participantes tenían conocimiento de que iban a participar en una investigación que incluía una experiencia de Realidad Virtual, pero no tenían información acerca del escenario de la inmersión.

Tabla 27: Porcentaje de participación por sexo

Hombres	Mujeres
58%	42 %

La participación por edades también es similar en todos los tramos excepto en el tramo correspondiente a las personas mayores de 60 años.

Tabla 28: Porcentaje de edades de usuarios

Edad de los participantes	%
< 12	26 %
12-18	21 %
19-35	25 %
36-60	27 %
> 60	1 %

⁸³ Asociación Profesional de Técnicos de Bomberos

El nivel de educación o estudios de los participantes se asigna automáticamente para las personas menores que están en edad de educación obligatoria y para el resto de los participantes se les preguntaba dentro del cuestionario según el protocolo.

Tabla 29: Porcentaje de participantes según nivel de estudios

Enseñanza obligatoria	50 %
Educación Universitaria	43%
Otros estudios	7%

Tiempo de reconocimiento es el intervalo que transcurre desde el inicio de la señal de alarma hasta que el usuario interpreta que hay una emergencia real o amenaza. Para ello se toma como referencia el primer movimiento brusco del casco con más de 15° de giro.

El 25% de los participantes no reconoció de manera inmediata la señal de alarma como medio de advertencia para iniciar la evacuación del edificio.

Tabla 30: Tiempo de reconocimiento. Porcentaje de participantes demora-instantáneo

Demora	Instantáneo
25%	75%

A continuación, se expone el promedio de participantes que tuvieron un tiempo de demora en el intervalo del Tiempo de reconocimiento por edad y sexo.

Tabla 31: Promedio de participantes con tiempo de demora en Tiempo de reconocimiento

	Todos/as	Hombres	Mujeres
Todos/as	24,84%	28,75%	20,78%
>18 años	15,55%	17,44%	11,90%
< 18 años	39,06%	43,75%	31,43%

El intervalo de demora en el Tiempo de reconocimiento está dentro de un intervalo entre 1 segundo y 5 segundos, siendo el promedio entre todos los participantes de 3,7 segundos.

A continuación, se expone en la Tabla 32 el promedio de tiempo de demora por edad y sexo.

Tabla 32: Demora en Tiempo de reconocimiento por edad y sexo

Edades	Hombres	Mujeres
Todos/as	3,60	3,75
> 18 años	3,40	4,40
< 18 años	3,78	3,45

El intervalo en el Tiempo de reconocimiento no implica que el participante inicie el desplazamiento hasta una zona de seguridad.

Tiempo de respuesta es el intervalo que transcurre desde el tiempo de reconocimiento, es decir cuando el usuario interpreta que existe una amenaza, hasta el inicio del traslado para evacuar el edificio.

El intervalo de los tiempos de respuesta varía desde los 2 segundos hasta un máximo de 119 segundos. El promedio entre todos los participantes es de 57 segundos.

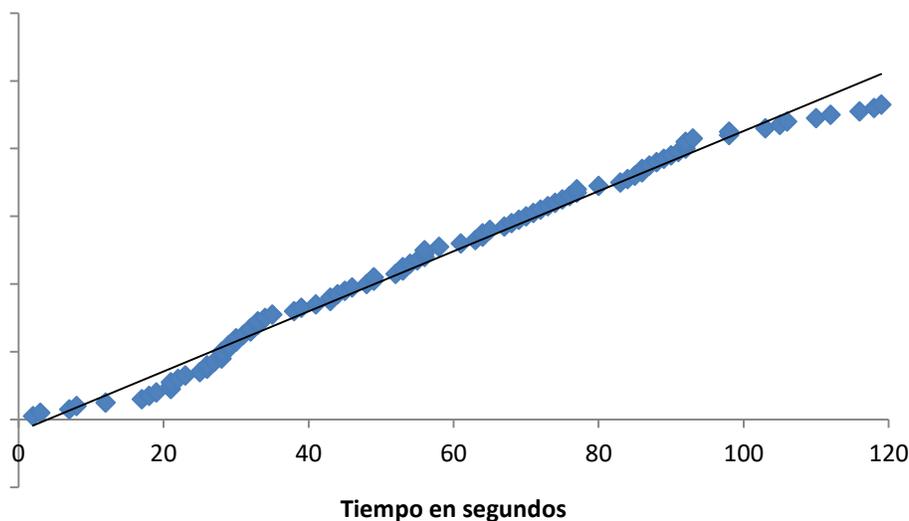


Figura 33: Muestra de tiempo de respuesta por participante en segundos

Tabla 34: Tiempo de respuesta

	Todos/as	Hombres	Mujeres
Todos/as	57,27	57,08	57,46
>18 años	54,41	54,05	55,52
< 18 años	57,46	62,56	59,82

La señalización de emergencia en el edificio virtual se corresponde fielmente en ubicación, tamaño y tipografía con las de un edificio existente. El dispositivo de Realidad Virtual capta el instante en el que el participante visualiza cada una de las señales de evacuación de manera independiente. En el recorrido de evacuación hay un total de 8 señales,

de las cuales las 6 últimas del recorrido fueron ignoradas por los participantes. Del total de los participantes, un 6,4% visualizaron al menos una señal.

Tabla 35: Visualización de señales de evacuación

	Todos/as	Hombres	Mujeres
>18 años	7,86%	6,4%	9,52%
< 18 años	4,47%	9,37%	0%

Una de las opciones programadas una vez suena la señal de alarma de incendios es la posibilidad de confinarse dentro de uno de los despachos del edificio en los que el participante entiende que es el modo más seguro de no sufrir daños en el incendio, renunciando a salir del edificio. Esta opción fue elegida por el 7,0% de los participantes.

Tabla 36: Porcentaje de participantes que se confinan en un despacho

	Todos/as	Hombres	Mujeres
>18 años	6,67%	10,42%	2,38%
< 18 años	4,69%	6,25%	3,13%

En el recorrido de evacuación, el participante puede optar por evacuar a través de una escalera inundada de humo. La densidad del humo en el entorno virtual es suficiente para que el participante pueda interpretar que dicho recorrido es inaccesible.

El 19,11% de los participantes optaron por desplazarse a través de la escalera inundada de humo como medio para llegar a una zona segura.

Tabla 37: Porcentaje de participantes que opta por escalera inundada de humo

	Todos/as	Hombres	Mujeres
>18 años	20,0%	14,58%	4,76%
< 18 años	18,75%	21,88%	14,29%

El participante debe acceder a la planta seleccionada obligatoriamente a través de un ascensor. Una vez suena la señal de alarma, el ascensor se bloquea y el participante debe elegir un recorrido distinto al que ha utilizado para acceder con el fin de salir del edificio. El dispositivo detecta si el participante intenta acceder al ascensor a pesar de estar bloqueado. El intento de usar el ascensor como medio de evacuación lo eligió el 7,0% de los participantes.

Tabla 38: Porcentaje de participantes que intentan evacuar en ascensor

	Todos/as	Hombres	Mujeres
>18 años	5,40%	10,42%	2,38%
< 18 años	7,46%	9,38%	5,71%

Durante la experiencia el participante lleva un dispositivo para registrar la frecuencia cardiaca. La frecuencia cardiaca se registra cada segundo desde el inicio de la experiencia hasta el final de la misma para analizar el incremento que pueda producirse desde el sonido de la alarma de incendios. El promedio de incremento de la frecuencia cardiaca durante el Tiempo de evacuación es del 25%.

Tabla 39: Porcentaje de incremento de la frecuencia cardíaca durante la experiencia

	Todos/as	Hombres	Mujeres
>18 años	35,52%	32,40%	37,81%
< 18 años	15,84%	14,3%	16,85%

El participante, una vez que accede a la plata primera a través del ascensor recorre el mismo tramo en el acceso y en la evacuación. En este tramo de ida y vuelta el casco de realidad Virtual registra los movimientos bruscos que realiza el participante.

El nivel de ansiedad estado y nivel de ansiedad rasgo son datos que no se han podido registrar a través del dispositivo de Realidad Virtual, pero pueden ayudar a comprender el estado anímico del participante antes y después de finalizar la experiencia para poder analizar los datos registrados.

Las respuestas de los participantes en el cuestionario se valoran con 0 a 4 puntos. Los valores expuestos a continuación indican el incremento de porcentaje de puntos entre los estados de ansiedad rasgo y ansiedad estado. El promedio de incremento medio es del 20,15%.

Tabla 40: Porcentaje de incremento del nivel de ansiedad

	Todos/as	Hombres	Mujeres
>18 años	12,84%	11,32%	14,09%
< 18 años	27,46%	22,03%	34,96%

Las trayectorias de los participantes reflejan el comportamiento desde el momento en el que suena la alarma, por lo tanto, la trayectoria registrada corresponde con el Tiempo de

evacuación. A continuación, se exponen ejemplos de las trayectorias de las evacuaciones con la interpretación del comportamiento.

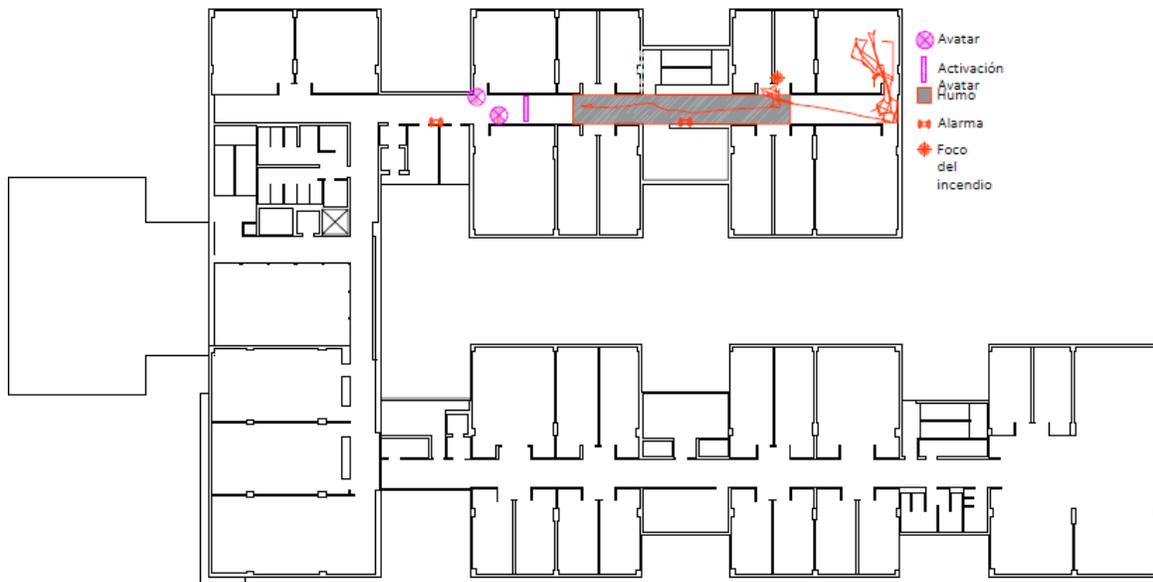


Figura 47: Ejemplo de trayectoria 1

El participante duda antes de iniciar el desplazamiento, por lo que el tiempo de reconocimiento es excesivo y no consigue atravesar la zona inundada por el humo.

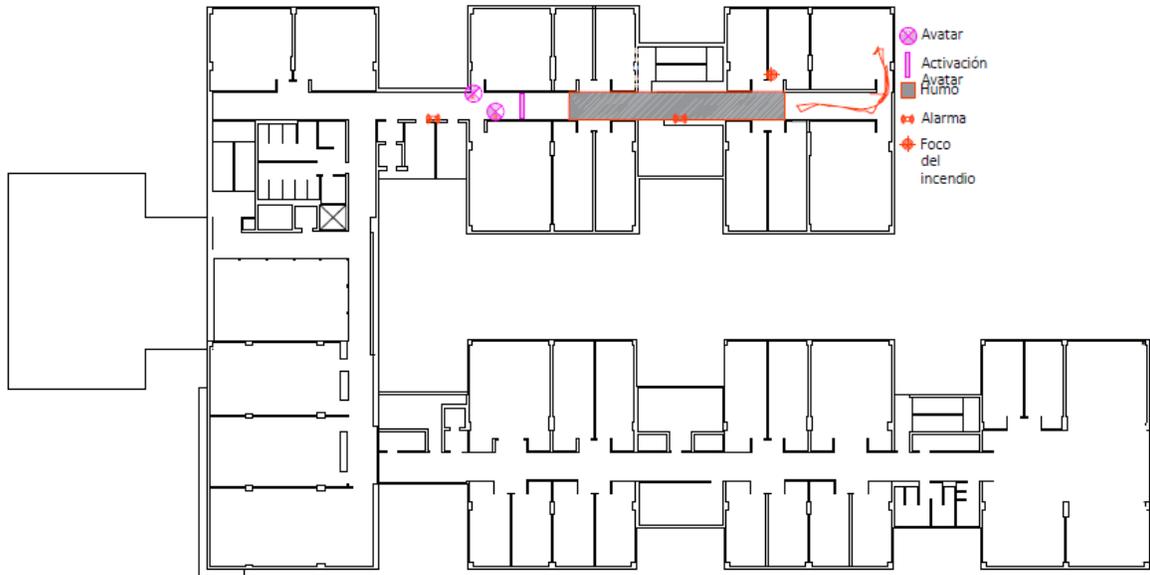


Figura 48: Ejemplo de trayectoria 2

El participante decide confinarse en el despacho y desiste de buscar una salida del edificio.



Figura 49: Ejemplo de trayectoria 3

El avatar del E.A.E. indica al participante que debe evacuar inmediatamente. El participante logra acceder a la escalera protegida y completa la evacuación.

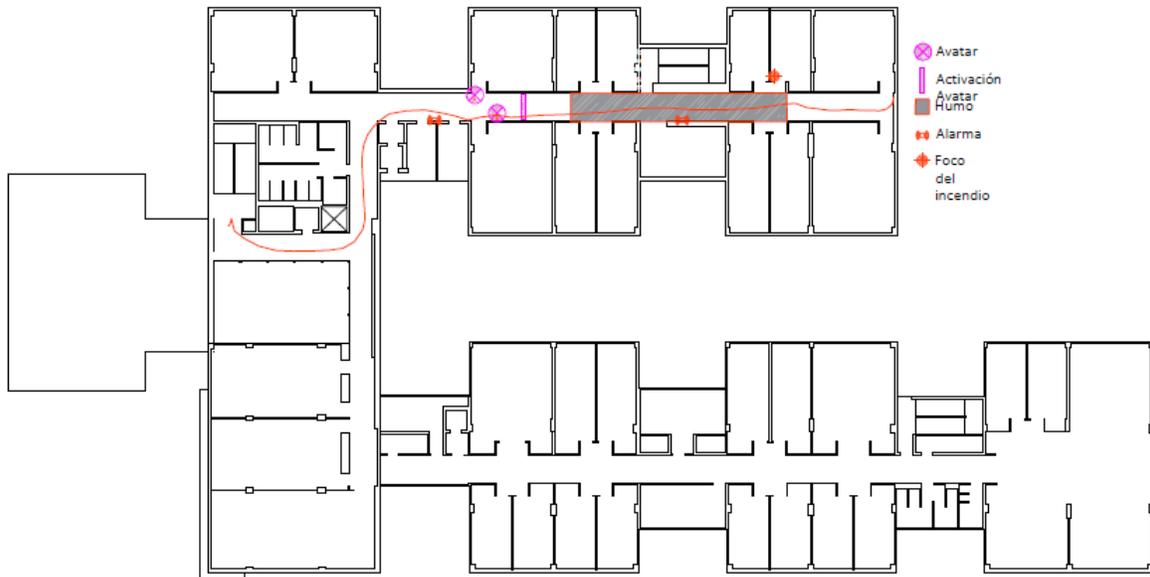


Figura 50: Ejemplo de trayectoria 4

El avatar del E.A.E. indica al participante que es una falsa alarma. El participante logra acceder a la escalera protegida y completa la evacuación.

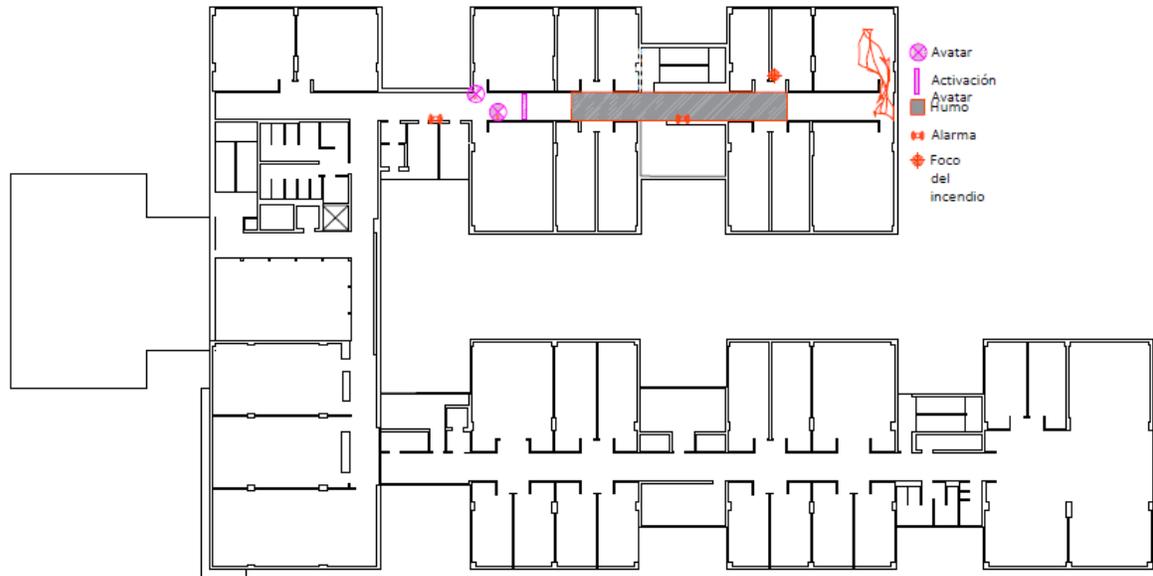


Figura 51: Ejemplo de trayectoria 5

El participante duda antes de iniciar el desplazamiento, por lo que el tiempo de reconocimiento es excesivo. No inicia el desplazamiento hacia una zona segura.



Figura 52: Ejemplo de trayectoria 6

El participante duda antes de iniciar el desplazamiento, por lo que el tiempo de reconocimiento es excesivo y no consigue atravesar la zona inundada por el humo.

En la experiencia se propuso como tiempo límite 120 segundos. Se consideraba que la evacuación no tenía éxito si el participante se confinaba en el despacho dado que no es un

sector alternativo, si utilizaba la escalera inundada de humo o si su tiempo de evacuación era superior a 120 segundos.

Con estas condiciones consiguieron acceder a una zona segura el 40% de los ocupantes y por diferentes motivos no lo consiguió el 60 %.

Tabla 41: Porcentaje de éxito en la evacuación

	Todos/as	Hombres	Mujeres
Consigue evacuar	39.13%	32,60%	8,69%
No consigue evacuar	60,86%	39,13%	21,73%

11. Conclusiones

Analizados los resultados obtenidos se puede concluir que las herramientas de simulación han demostrado ser eficaces para la captura de datos de comportamiento humano en caso de emergencia de incendio en tiempo real.

Ventajas del uso de la tecnología RV en el ámbito del comportamiento humano en caso de incendio

A continuación se relacionan los aspectos positivos que proporciona esta metodología para los investigadores.

Validez interna, es decir, la medida en que las relaciones de causa y efecto pueden identificarse con precisión [173], siendo éste uno de los puntos más interesantes para el investigador. El control sobre cada uno de los factores del entorno y de la dinámica del incendio en la programación es extremadamente complejo para obtener en un laboratorio.

La realidad virtual permite no sólo disponer de infinitos escenarios, siendo los escenarios tanto edificios como de casos de incendio, sino también permite analizar el comportamiento en distintos recorridos de evacuación dentro del edificio o con distintas condiciones de visibilidad. Mediante la programación es fácil diseñar múltiples casos donde el humo tiene una influencia en el comportamiento y la velocidad de desplazamiento del participante. El humo puede programarse con distintos grados de estratificación y distintos coeficientes de extinción.

Réplica del experimento. En el caso estudiado se ha realizado la misma experiencia a 300 participantes con el mismo escenario, es decir, el mismo edificio, la misma misión y el

mismo desarrollo de incendio. De esta manera es posible analizar el comportamiento de diferentes perfiles en las mismas condiciones antes y después de la señal de alarma de incendios.

La posibilidad de réplica también puede extenderse al comportamiento del mismo participante en el mismo escenario, pero con experiencia previa.

Gracias a la exactitud de la réplica que en condiciones de laboratorio serían casi imposibles de obtener, es posible dar validez y fiabilidad a los datos obtenidos.

Validez externa, referida a si los resultados del estudio son generalizables a un entorno de la vida real [173] y responde, por tanto, a la pregunta de si los resultados de un estudio obtenidos en laboratorio pueden generalizarse a distintas situaciones o perfiles en otros entornos. La metodología de captación de datos mediante RV permite controlar los factores de confusión, del mismo modo que se hace con cualquier otro factor, siendo estos factores de confusión aquellos que pueden distorsionar de algún modo la relación entre dos variables.

Estos factores de confusión no pueden controlarse en otras experiencias como los simulacros de incendios.

Validez ecológica, puede considerarse como parte de la validez externa. Se refiere al grado de realismo que alcanza este método de investigación en comparación con el mundo real, analiza el entorno de la experimentación y determina si influye, y cómo influye en el comportamiento de los participantes [8]. Uno de los problemas que encuentra una investigación en la que el participante está inmerso en un escenario de emergencia es la representatividad de las muestras, que puede ser aplicado a los propios participantes pero que

es esencial en la situación experimental. El concepto de validez ecológica [213] puede utilizarse como justificación o crítica a posibles desviaciones en la experimentación y está relacionado con las teorías de Gibson [124] acerca de la percepción visual de los objetos.

La Realidad Virtual tiene en este sentido ventajas y desventajas frente al experimento en laboratorio, por lo que dependiendo del objetivo de la investigación, puede ser uno u otro más adecuado. Por ejemplo, si se desea estudiar el impacto del calor o de la inhalación de humo, el laboratorio puede ser más adecuado. Durante la etapa de diseño del protocolo objeto de este estudio se plantearon variables como el calor mediante un dispositivo de radiación que finalmente fue descartada, dado que podía dañar el dispositivo RV y se hicieron algunas experiencias con humo que dependiendo de la densidad inhabilitaba los receptores.

Este tipo de variables también se sacrificaron dado que la experiencia de usuario pretendía captar el comportamiento en la fase de pre-evacuación, para lo cual era necesario que en el espacio dedicado no hubiera indicios como rastros de humo o calor que hubieran puesto en alerta al participante.

La experimentación con RV, a pesar del realismo o la potencia del dispositivo, será en cualquier caso una abstracción de la realidad y, por tanto, no puede tener una validez ecológica absoluta, en primer lugar porque aunque el participante no sepa que sucederá en la inmersión sí sabe que está dentro de un entorno virtual. Y en segundo lugar, porque los movimientos en el entorno virtual pueden ser sencillos e intuitivos, pero no ser realistas.

A pesar de estos inconvenientes, y aunque no pueda asegurarse una validez ecológica absoluta, esta metodología tiene una mayor cercanía a la realidad que cualquiera de las anteriores al ser una experiencia inmersiva y, en caso de que no se proporcione información

previa, es posible contrastar el comportamiento antes y después del sonido de la alarma de incendios.

La introducción de la gamificación en la metodología es un factor que consigue incrementar la validez ecológica puesto que, por un lado, permite un intervalo de tiempo para la adaptación del participante al entorno virtual, lo que de alguna manera le aleja de la realidad, y por otro, permite incorporar una misión que, además permite el análisis de variables como la de objetivo [166]

Seguridad de los participantes. Tal como se ha expuesto, los incendios no se pueden reproducir y en ningún caso es posible realizar experiencias realistas en laboratorio con personas. La Realidad Virtual permite no solo introducir al participante a un entorno de peligro, sino que puede adaptarse para temas formativos o como terapia, tal como se ha expuesto [199].

Es evidente que aunque la inmersión técnicamente sea muy precisa, el participante tiene conocimiento de que su vida no está en peligro y que no sufrirá ningún daño físico. Pero por otro lado, tal como se ha podido analizar en el capítulo de resultados, hay tres variables que indican que el participante tiene una inmersión que afecta a sus decisiones, siendo éstas el incremento en el nivel de ansiedad estado, el incremento en la frecuencia cardíaca y el incremento de los movimientos bruscos de cabeza.

Captación y registro en tiempo real. La RV permite al investigador hacer un seguimiento del progreso de cada participante obteniendo en tiempo real los datos de comportamiento.

Esto permite valorar de manera inmediata los objetivos de la investigación y por otra parte, permite reprogramar el escenario del incendio en tiempo real dependiendo del comportamiento del participante.

Así, es posible introducir personajes virtuales que pueden modificar la conducta del participante o bien modificar el desarrollo del incendio en función de la trayectoria seleccionada. Esta ventaja permite explorar campos como la formación de equipos de intervención donde es posible relacionar variables como la frecuencia cardiaca, la tensión arterial o los movimientos de cabeza con factores como la experiencia previa o el entrenamiento.

Precisión. Conjuntamente con el registro en tiempo real, otra de las ventajas es la precisión de los datos registrados. Las mediciones se registran de manera automática, sin posibilidad de intervención o subjetividad por parte del participante. El sistema de captación RV permite además captar el posicionamiento exacto de la mirada del participante o las coordenadas de posicionamiento de la trayectoria recorrida durante la evacuación.

Análisis de la percepción. La RV es un medio que permite programar distintos indicios [109] con diferente intensidad, afectando a los sentidos de la vista y el oído con el fin de registrar la respuesta en cada caso. De igual modo, la RV es un medio efectivo para investigar la comunicación y la respuesta a las señales sonoras de alarma, los mensajes de voz y las señales de evacuación. La RV permite comprobar la idoneidad de los medios de comunicación de un edificio existente o en proceso de diseño, así como propuestas de frecuencias o volumen en las señales auditivas o formas, tamaños, pictogramas o colores en las señales visuales [125].

Parámetros fisiológicos. Aunque el sistema RV no está en general diseñado de manera expresa para captar parámetros fisiológicos como la frecuencia cardíaca o la tensión arterial, sí es posible registrar dichos parámetros mediante periféricos adaptados en la programación y vincular dichos datos fisiológicos con otros parámetros como el tiempo o el posicionamiento dentro del entorno virtual.

Los parámetros fisiológicos permiten a los investigadores analizar de manera más precisa el comportamiento humano bajo amenaza y comprobar si la alteración de estos parámetros puede llegar a provocar confusión o alteraciones en la conducta habitual.

Presupuestos reducidos. La investigación mediante el uso de dispositivos de Realidad Virtual tiene un presupuesto inicial, dado que es necesario asumir el coste del propio dispositivo y la programación del mismo. Los escenarios programados pueden ser utilizados con infinitos participantes, y con la programación inicial adecuada, los escenarios tanto del entorno como del incendio pueden modificarse con facilidad.

Por otra parte, el dispositivo es fácilmente transportable, por lo que los participantes no tienen por qué desplazarse hasta un laboratorio o centro específico.

En el caso de estudio, se desplazó el equipo completo hasta pabellones donde se producían encuentros y jornadas de ámbito familiar, por lo que los perfiles de los participantes eran muy diversos y se recibieron más solicitudes de voluntarios participantes de los que por tiempo se podían asumir. Esto lleva a otra de las ventajas de esta metodología.

Solicitud de participantes. La experimentación con dispositivos de Realidad Virtual permite la participación de usuarios de todas las edades, estatura y complejión.

La gamificación y el interés por tecnologías aun no generalizadas son factores que facilitan el reclutamiento de participantes.

Otra ventaja al utilizar un sistema RV es el cumplimiento de compromisos éticos como la Declaración de Helsinki [214] elaborada por la Asociación Médica Mundial o WMA para las investigaciones con seres humanos. Gracias al seguimiento en tiempo real de las pruebas, es posible detectar si alguno de los usuarios no es capaz de discernir entre el entorno virtual y la realidad, como podría producirse en niños de corta edad.

Limitaciones y posibles mejoras en el uso de la tecnología RV

A continuación se expone una relación de limitaciones y posibles mejoras para esta metodología:

Validación externa y validez ecológica. La validez ecológica como parte de la validez externa no puede ser absoluta. Los entornos simulados a pesar de replicar entornos reales con gran detalle tienen la desventaja de que el participante aun estando en una inmersión espacial y sensitiva, conoce este propio hecho. Las amenazas y la sensación de riesgo físico están limitadas.

Usabilidad del dispositivo. Los sistemas actuales de RV requieren una equipación y ajustar diversos dispositivos al cuerpo del participante. El uso de mandos en las manos o dispositivos en los pies para el desplazamiento horizontal restan la sensación de inmersión y por otra parte, limitan las experiencias.

Esta metodología requiere la instalación y adaptación de un dispositivo por participante, por lo que las experiencias son individuales. Esto supone una inversión en tiempo.

Otras limitaciones son la adaptación al entorno virtual por parte de participantes no habituados al uso de dispositivos electrónicos ya que aun siendo muy intuitivos, requieren para su rápida adaptación una mínima experiencia previa que en algunos perfiles no existe. Este hecho también lleva a que los perfiles de participantes con fácil adaptación al dispositivo virtual se desplazarán con mayor facilidad en el entorno que aquellos con menor destreza.

Otra limitación en la usabilidad es la imposibilidad de realizar desplazamientos a través de escaleras realistas o la posibilidad de valorar el cansancio del participante en desplazamientos largos.

Limitación sensorial. El uso de la RV actualmente implica una inmersión visual y auditiva, pero no así referida a otros sentidos. El sentido del tacto, del olfato o el gusto son mejoras que pueden ofrecer una experiencia más realista al participante.

Simulación de la capacidad. En el presente estudio se programaron diversas velocidades de desplazamiento virtual en función de la edad, pero no en función de la capacidad real del participante. Así mismo, se valoró la posibilidad de fabricar una silla de ruedas adaptada que pudiera integrarse como un periférico más dentro del sistema virtual.

La simulación para personas con discapacidad debe estudiarse valorando la diversidad multifuncional, incluyendo a las personas con discapacidad intelectual, para quienes sería necesario un análisis profundo y específico.

Efectos no deseados. El uso de dispositivos de Realidad Virtual puede tener una serie de efectos adversos o ciber-molestias que afectan a una parte de los participantes, son leves y temporales. En este sentido Stanney [215] define las ciber-molestias como los efectos

secundarios tras la exposición a entornos virtuales. Estas molestias tienen su origen en el conflicto que un entorno virtual genera en la integración sensorial y espacial. Los entornos virtuales producen una adaptación inadecuada entre el sistema visual, el sistema vestibular y el sistema postural. El participante inmerso en un entorno virtual recibe señales de desplazamiento, pero el sistema vestibular indica al cerebro que en realidad no existe dicho desplazamiento. La investigación de los efectos secundarios por uso de la RV [216] determina que el tiempo de uso puede producir un aumento de la ansiedad, molestias subjetivas tales como mareos, cansancio y pérdida de equilibrio, es decir, pérdida de la habilidad para mantener el centro de gravedad del cuerpo en su base de apoyo y en algunos casos graves, molestias que podrían explicarse por una predisposición a mareos o desorden vestibular. Esto implica que no todos los candidatos pueden finalmente ser usuarios de esta tecnología y que en caso de producirse alguno de estos síntomas durante la experiencia, invalidarían los resultados obtenidos acerca del comportamiento humano.

Otros riesgos pueden ser la exposición virtual al fuego a participantes con fobias específicas o participantes con una especial sensibilidad a los sonidos de las alarmas o a la luz estroboscópica, dado que algunos dispositivos de señales visuales emiten una fuente luminosa mediante destellos y con una sucesión rápida.

Propuesta de futuras investigaciones

En relación al estudio del comportamiento humano en caso de incendio, algunos aspectos que pueden estudiarse gracias a la RV y que actualmente no han sido suficientemente investigados son:

En primer lugar, disponer de una to general del comportamiento humano en caso de incendio. Como se ha expuesto anteriormente, los actuales estudios se componen de las denominadas mini teorías [96]. Es necesaria una teoría que integre todos los estudios que se han realizado hasta el momento y gracias a un desarrollo de la tecnología y, en particular, de la metodología de captura de datos mediante RV sería posible.

Esta teoría integral proporcionaría la información necesaria para poder crear modelos [217], [176] más precisos para su uso en simuladores informáticos. Según Gwynne, los estudios de Canter, Breaux y Sime [218] se centran principalmente en la vinculación de las acciones de evacuación entre sí, pero no identifican el por qué los ocupantes han tomado esas decisiones.

En el estudio de modelo realizado por Kuligowski con motivo del ataque al WTC, [108] se pudo determinar que antes del inicio de la evacuación hubo una fase en la que los ocupantes recabaron información y otra en la que actuaron para proteger a los demás y a ellos mismos. Tras estas fases iniciales, la percepción del riesgo fue el factor que iniciaba el desplazamiento para acceder a una zona de seguridad. Esta percepción era distinta dependiendo de la profesión o las experiencias previas. Así, responsables de seguridad, militares o quienes habían vivido un incendio anteriormente, iniciaron antes el desplazamiento, aunque también tenían influencia las conexiones sociales. Esta información tiene limitaciones evidentes, como la imposibilidad de aplicarlo a otros entornos o no tener en cuenta las decisiones de las personas que fallecieron.

Para poder llegar a esta teoría integral [219] es necesario elaborar modelos que puedan anticipar las decisiones en determinados momentos, tanto en la fase de pre-evacuación como

en la fase de desplazamiento. Algunos estudios han tratado de predecir el tiempo de evacuación [220], [221], también se ha tratado de cuantificar el comportamiento a través de modelos, como el caso del informe publicado por NIST IR 7914 [222] basado en los datos obtenidos en el WTC [108].

Según Kuligowsky, [219] actualmente, estos datos cualitativos y cuantitativos que utilizan los modelos [223] sólo arañan la superficie del desarrollo de un entorno de conocimiento que prediga el comportamiento humano en caso de incendio. Queda mucho trabajo por hacer para mejorar la comprensión de la conducta y sin datos, no es posible alcanzar esa teoría integral antes mencionada. Esta teoría integral sobre el comportamiento humano en caso de incendio se incorporaría como una herramienta más al ámbito de la ingeniería de protección contra incendios y a los procedimientos de evacuación con el fin de que el campo del comportamiento no pueda ser ignorado o descartado en los análisis basados en prestaciones.

La Realidad Virtual y otros sistemas similares como la Realidad Aumentada han demostrado ser una herramienta válida, eficaz y sencilla para entender el comportamiento humano en caso de incendio.

12. Referencias

- [1] S. Moreno, G. Muñoz, J. Hernández y J. Monclús, Víctimas de incendios en España en 2017, Fundación MAPFRE y APTB, 2018.
- [2] B. J. Meacham, «A Process for Identifying, Characterizing, and Incorporating Risk Concepts into Performance-Based Building and Fire Regulation Development,» Clark University, Worcester, MA., 2000.
- [3] G. Proulx, «Occupant Behaviour and Evacuation,» National Research Council, Ottawa, 2001.
- [4] R. Ono, «Do people behave as expected in emergency situations?,» de 7th International Congress on Fire Safety Engineering, Madrid, 2013.
- [5] L. Yang, W. F. Fang y W. C. Fan, «Modeling occupant evacuation using cellular automata - Effect of human behavior and building characteristics on evacuation,» Journal of Fire Sciences, vol. 21, nº 3, pp. 227-240, 2003.
- [6] S. M. Lo, Z. Fang, P. Lin y G. S. Zhi, «An evacuation model: The SGEM package,» Fire Safety Journal, vol. 39, nº 3, pp. 169-190, 2004.
- [7] T. S. Shen, «ESM: a building evacuation simulation model,» Building and Environment, vol. 40, pp. 671-680, 2005.
- [8] F. Valle, «El problema de la validez ecológica,» Estudios de psicología, vol. 6, pp. 135-151, 1985.
- [9] J. S. Tubbs y B. J. Meacham, Egress Design Solutions: A Guide to Evacuation and crowd Management Planning, John Wiley & Sons, 2007.
- [10] M. T. Kinateder, H. Omori y E. D. Kuligowski, «The Use of Elevators for Evacuation in Fire Emergencies in International Buildings,» 2014.
- [11] J. H. Klote, S. Deal, E. A. Donoghue, B. M. Levin y N. E. Groner, «Fire Evacuation by Elevators,» Elevator World 41, 1993.
- [12] J. Sime, «The concept of panic,» de Fires and Human, D. Canter, 1980, pp. 63-81.
- [13] J. P. Keating, «The myth of panic,» Fire Journal, pp. 57-61, 1977.
- [14] E. L. Quarantelli, «Panic behavior: some empirical observations,» de Human Response to Tall Buildings, D.J. Conway, 1975, pp. 336-350.
- [15] E. Norber, A. Well y S. Moss, «Alarms for the hearing-impaired,» Fire Prevention, pp. 28-31, 1990.

- [16] E. Cable, «An Analysis of Delay in Staff Response to Fire Alarm Signals in Health Care Occupancies,» Worcester Polytechnic Institute, 1993.
- [17] A. Ozkaya, «A Qualitative Approach to Children of Developing Countries from Human Behaviour in Fire Aspect,» de Proceeding of the Second International Symposium, London, 2001.
- [18] M. Ball y D. Bruck, «The Effect of Alcohol upon Response to Fire Alarm Signals in Sleeping Young Adults,» de The Third International Symposium on Human Behaviour in Fire, Belfast, 2004.
- [19] T. Mc Clintock, T. Shields, A. Reinhardt-Rutland y J. Leslie, «A Behavioural Solution to the Learned Irrelevance of Emergency Exit Signage,» de Proceedings of the Second International Conference of Human Behaviour in Fires, Boston, 2001.
- [20] J. I. Leite Martínez, «Método de cálculo para la asignación de ocupantes a los elementos de evacuación de un edificio bajo la hipótesis de bloqueo,» 2015.
- [21] D. Nilsson, «Exit choice in fire emergencies - Influencing choice of exit with flashing lights,» Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University., Lund, 2009.
- [22] G. Proulx, «Evacuation Planning for Occupants with Disability,» National Research Council Canada, Ottawa, 2002.
- [23] K. Tierney, M. Lindel y R. Perry, «Facing the Unexpected: Disaster Preparedness and Response in the United States,» Joseph Henry Press, 2001.
- [24] K. Tierney, «Disaster Preparedness and Response: Research findings and guidance from the social science literature,» Disaster Research Center, Newark, 1993.
- [25] D. Mileti, T. Drabek y E. Haas, «Human Systems in Extreme Enviornments: A Sociological Perspective,» Institute of Behavioral Science, 1975.
- [26] E. L. Quarantelli, «Sociology of Panic,» de The International Encyclopedia of the Social and Behavioral Sciences, Oxford, Elsevier Science, 2002, pp. 11020-11023.
- [27] National Institute of Standards and Technology, «NCSTAR 1-7: Occupant Behavior, Egress, and Emergency Communication,» de Final Report of the federal Building and Fire Investigation of the World Trade Center Disaster, Maryland, 2005.
- [28] J. Lynch, «Nocturnal Olfactory Response to Smoke Odor,» de Human Behaviour in Fire: Proceedings of the First International Symposium, Belfast, 1998.
- [29] T. Jin, «Studies on Human Behavior and Tenability in Fire Smoke,» de The Fifth International Symposium on Fire Safety Science, Belfast, 1997.

- [30] J. S. Tubbs y B. J. Meacham, «Myths and Missconceptions: Fire fighters` Use of Egress Components Negatively Affect Egress Times,» de Egress Design Solutions: A Guide to Evacuation and Crowd Management Planning, ARUP, 2007, p. 313.
- [31] J. Hall Jr., «High-Rise Building Fires,» National Fire Protection Association, Quincy, MA, 2005.
- [32] J. R. Alonso Pereira, «De los orígenes al siglo XXI,» de Introducción a la historia de la arquitectura: De los orígenes al siglo XXI, 2005, pp. 13-14.
- [33] J. J. Fruin, Pedestrian Planning and Design, Elevator world Inc, 1971.
- [34] R. W. Perry, M. R. Greene y M. K. Lindell, «Enhancing evacuation warning compliance: Suggestions for emergency planning,» Disasters, vol. 4, nº 4, pp. 433-449, 1980.
- [35] J. F. E. Lorente, «La teoría de la proporción arquitectónica,» Artigrama, nº 16, pp. 229-256, 2001.
- [36] J. S. Tubbs y B. J. Meacham, «Historic events,» de Egress Design Solutions, 2007, p. 55.
- [37] M. Á. Santamaría Villaescuerna, «El incendio del hotel Corona de Aragón,» Armas y Cuerpos, nº 141, pp. 81-86, 2019.
- [38] A. García Hegardt, «Especial Incendio Hotel Corona,» 080 Cultural Deportiva Bomberos Zaragoza, 2004.
- [39] Ayuntamiento de Madrid, «Historia y museo,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/El-Ayuntamiento/Emergencias-y-seguridad/Cuerpo-de-Bomberos?vgnextfmt=default&vgnextoid=82f3f29f6b9ac010VgnVCM1000000b205a0a6RCRD&vgnextchannel=d11c9ad016e07010VgnVCM100000dc0ca8c0RCRD&idCapitulo=4205359#>. [Último acceso: 1 septiembre 2020].
- [40] J. C. Pérez Martín, Formulación de un método de evaluación del riesgo en caso de incendio en el marco del Código Técnico de la Edificación, Madrid: tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 2011.
- [41] Schneider Electric, «Lithium-ion Rechargeable Battery,» 2015. [En línea]. Available: https://download.schneider-electric.com/files?p_File_Name=AMAE-A67LQZ_R0_EN.pdf&p_Doc_Ref=SPD_AMAE-A67LQZ_EN. [Último acceso: 1 septiembre 2020].
- [42] T. Piqué Ardanuy, «NTP 361: Planes de emergencia en lugares de pública concurrencia,» Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo , 1994.

- [43] C. Leithead y A. Lind, «Heat Stress and Heat Disorders,» Cassel Publications, 1963.
- [44] . M. M. Klinghoffer, Triage Emergency Care Handbook, Technomic Publishing Company, 1985.
- [45] J. H. Veghte, «Physiologic Response of Fire Fighters Wearing Structural and Hazmat Protective Clothing,» de Second Annual Conference on Protective Clothing, Clemson, 1988.
- [46] J. Huck, «Evaluation of Heat Stress Imposed by Protective Clothing,» de First Annual Conference on Protective Clothing, Clemson, 1987.
- [47] American Society for Testing and Materials, «Standard Guide for Heated Systems Surface Conditions That Produce Contact Burn Injuries,» Conshohocken, 1997.
- [48] D. Bynum y V. J. Petri, «Domestic Hot water Scald Burn Lawsuits – The Who, What, When, Why, Where How,» de Annual ASPE Meeting, Indianapolis, 1998.
- [49] . J. F. Krasny y S. Stephen, «Fibers and Textiles, Fire Protection Handbook. 16th Edition.,» 1986.
- [50] O. de la Cruz, «Asociación Profesional de Técnicos de Bomberos,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.bomberostv.org/flashover-fuenlabrada/>. [Último acceso: 1 septiembre 2020].
- [51] R. Zapata-Sirvent y L. Ceballos, Clasificación de las quemaduras y agentes etiológicos. Capítulo 3, Ateproca, Quemaduras. Tratamiento Crítico y Quirúrgico.
- [52] J. M. Suay Belenguer, Manual de Instalaciones Contrs Incendios, Madrid: AMV ediciones, 2010, pp. 15-36.
- [53] National Institute of Standards and Technology, «nist.gov,» [En línea]. Available: <https://www.nist.gov/services-resources/software/fds-and-smokeview>.
- [54] J. Bryan, «A study of survivors' reports on the panic in the fire at the Arundal Park Hall,» 1957.
- [55] D. Canter, «Fires and Human Behaviour: Emerging Issues,» Fire Safety Journal, vol. 3, nº 1, pp. 41-46, 1980.
- [56] Instituto Nacional de Estadística, «INE,» 2020. [En línea]. Available: https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736176951&menu=ultiDatos&idp=1254735572981.
- [57] Bomberos de Navarra, «Investigación de incendios,» [En línea]. Available: http://www.bomberosdenavarra.com/documentos/ficheros_documentos/investigacion.pdf. [Último acceso: 1 septiembre 2020].

- [58] Boletín Oficial del Ayuntamiento de Madrid, 2014. [En línea]. Available: https://sede.madrid.es/csvfiles/UnidadesDescentralizadas/UDCBOAM/Contenidos/Boletín/2014/FEBRERO/Ficheros%20PDF/BOAM_7100_04022014150325056.pdf. [Último acceso: 1 septiembre 2020].
- [59] J. Murtra i Ferré, «Asociación Profesional de Técnicos de Bomberos,» 2013. [En línea]. Available: file:///C:/Users/carlo/Downloads/INFORME_M.A.171013.pdf. [Último acceso: 1 septiembre 2020].
- [60] R. Coté, «Life Safety Code handbook (8th ed., Supplement1),» National Fire Protection Association, Maryland, 2000.
- [61] «Italian Hall Confession,» Daily Mining Gazete, 1982.
- [62] R. L. Best, «Beverly Hills Super Club Fire, Southgate, KY, May 28, 1977,» National Fire Protective Association, Maryland, 1977.
- [63] National Fire Protective Association, «Fire investigation report. Dance Hall Fire (Rhythm Club),» Natchez, MS, 1940.
- [64] R. S. Moulton, «Cocoanut Grove Night Club Fire,» National Fire Protection Association, Boston, MA, 1962.
- [65] Consulting-Specifying Engineer, «Disasters Offer Lessons for Furure,» Reed Business Information U.S. Staff, 2003.
- [66] R. Sayers y S. Davenport, «Review of Carbon Monoxide poisoning,» United States Government Printing Office, Washington, D.C., 1930.
- [67] J. Barcroft, «The toxicity Atmospheres Containing Hydrocyanic Acid Gas,» Journal of Hygiene, vol. 31, pp. 1-34, 1931.
- [68] A. Moritz, F. Henriques y R. McLean, «A.R. Moritz, F.C. Henriques y R. McLean, The effects of inhaled heat on the air passages and lungs. An experimental investigation,» An experimental investigation, 1945.
- [69] K. Buettner, «Effects of Extreme Heat and Cold on Human Skin. II. Surface Temperature, Pain and Heat Conductivity in Experiments with Radiant Heat,» Journal of Applied Physiology, vol. 3, nº 12, pp. 703-713, 1951.
- [70] F. Kingman, E. Coleman y D. Rasbash, «The Products of Combustion in Burning Buildings,» British Journal of Applied Chemistry, vol. 3, pp. 463-468, 1953.
- [71] C. Hovland, I. Janis y H. Kelley, «Communication and Persuasion; Psychological Studies of Opinion Change,» Yale University Press, New Haven, 1953.
- [72] C. Fritz y E. Marks, «The NORC Studies of Human Behavior in Disaster.,» 1954.

- [73] H. Simon, «Models of Man: Social and Rational Mathematical Essays on Rational Human Behavior in Social Setting,» John Wiley and Sons, Inc, 1957.
- [74] Iornajarrettblanchard, «US deadly events,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.usdeadlyevents.com/1956-jan-29-oyster-roast-fire-arundel-park-hall-brooklyn-md-11/>.
- [75] D. Simms y P. Hinkley, «Fire Research Special Report No. 3: Protective Clothing Against Flames and Heat,» Her Majesty's Stationary Office, 1960.
- [76] D. Rashbash, «Smoke and Toxic Products Produced at Fires,» Plastic Institute Transaction and Journal, pp. 55-61, 1967.
- [77] B. Latané y J. Darley, «The Unresponsive Bystander: Why Does not He Help?,» Appleton-Century Crofts, 1970.
- [78] T. Drabek y K. Boggs, «Families in Disaster: Reactions and Relatives,» Journal of Marriage and the Family, vol. 30, n° 3, pp. 443-451, 1968.
- [79] V. V. M. Predtechenskiï y A. Milinskiï, «Planning for Foot Traffic Flow in Buildings,» Amerind, 1980.
- [80] R. Best, «Tragedy in Kentucky,» Fire Journal, vol. 72, n° 1, pp. 41-44, 1978.
- [81] J. Swartz, «Human Behavior in the Beberly Hills Fire,» Fire Journal, vol. 73, n° 3, pp. 73-74, 1979.
- [82] I. Janis y M. Leon, «Decision Making: A psychological analysis of conflict, choice, and commitment,» Free Press, 1977.
- [83] J. Pauls, «Building Evacuation: Research Findings and Recommendations in Fires and Human Behaviour,» John Wiley, 1980.
- [84] R. Perry, M. Lindell y M. Greene, Management, Evacuation Planning in Emergency, Lexington, MA: Lexington Books, 1981.
- [85] G. Ramachandran, «Informative Fire Warning Systems,» Fire Technology, vol. 27, n° 1, pp. 66-81, 1991.
- [86] J. Kleijnen, «Theory and Methodology: Verification and Validation of Simulation Models,» European Journal of Operation Research, vol. 82, pp. 145-162, 1995.
- [87] P. Brennan, «Impact of Social Interaction to Time to Begin Evacuation in Office Buildings Fires: Implications for Modelling Behaviour,» de International Interflam Conference Seventh Proceedings, London, 1996.
- [88] E. Galea, «The validation of Evacuation Models,» CMS Press, 1997.

- [89] S. Gwynne y E. Galea, «A Review of the Methodologies and Critical Appraisal of Computer Models used in the Simulation of Evacuation from the Built Environment,» CMS Press, 1997.
- [90] D. Purser y M. Bensilum, «Quantification of Behaviour for Engineering Design Standards and Escape Time Calculations,» de Proceedings of the First International Symposium on Human Behaviour in Fire, Belfast, 1998.
- [91] R. Peacock, P. Reneke, W. Davis y W. Jones, «Quantifying Fire Model Evaluation using Functional Analysis,» Fire Safety Journal, vol. 33, pp. 167-184, 1999.
- [92] D. Purser y M. Bensilum, «Quantification of escape behavior during experimental evacuations,» Building research Establishment Report, 1999.
- [93] D. Purser y M. Bensilum, «Quantification of behaviour for engineering design standards and escape time calculations,» Safe Science, vol. 38, pp. 157-182, 2001.
- [94] W. Feinberg, «Primary Group Size and Fatality Risk in a Fire Disaster,» de Second International Symposium on Human Behaviour in Fire, London, 2001.
- [95] W. Saunders, «Gender Differences in Response to Fires,» de Proceedings of the Second International Symposium on Human behaviour in Fire, London, 2001.
- [96] S. Gwynne, E. D. Kuligowski y M. Kinsey, «Human Behaviour in fire-Model Development and Application,» de 6th International Symposium on Human Behaviour in Fire, Cambridge, 2015.
- [97] H. Omer y A. Nahman, «A unified approach to disaster and trauma,» American journal of Community Psychology, vol. 22, n° 2, pp. 273-287, 1994.
- [98] A. P. Guerrero, «NTP 436: Cálculo estimativo de vías y tiempos de evacuación,» Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 1990.
- [99] S. Gwynne, L. Hulse y M. Kinsey, «Guidance for the Model Developer on Representing Human Behavior in Egress Models,» Fire Technology, vol. 52, n° 775-800, 2015.
- [100] Bentley, «Bentley,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.bentley.com/es/products/brands/legion>.
- [101] Oasys Massotion, «Oasys Massmotion,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.oasys-software.com/products/pedestrian-simulation/massmotion/>.
- [102] Thunderhead Pathfinder, «Thunderhead Pathfinder,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.thunderheadeng.com/pathfinder/>.
- [103] J. L. Villanueva Muñoz, «NTP 45: Plan de emergencia contra incendios,» Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo, 1983.

- [104] R. Lovreglio, «Data-Collection Approaches for the Study of the Decision-Making Process in Fire Evacuations,» de 1st SCORE@POLIBA WorkshopAt, Bari, 2015.
- [105] E. Kuligowski, R. Peacock y B. Hoskins, «A Review of Building Evacuation Models, 2nd Edition,» National Institute of Standards and Technology , Gaithersburg, 2010.
- [106] G. Proulx, «Movement of People: The Evacuation Timing,» SFPE Handbook, Bethesda, 2002.
- [107] M. T. Kinatader, E. Kuligowski, P. A. Reneke y R. D. Peacock, «A Review of Risk Perception in Building Fire Evacuation. Note 1840,» National Institute of Standard Technology.
- [108] E. D. Kuligowski, Terror defeated: Occupant sensemaking, decision-making and protective action in the 2001 World Trade Center disaster, University of Colorado, 2011.
- [109] J. Averill, D. Mileti, R. Peacock, E. Kuligowski, N. Groner, G. Proulx, P. Reneke y H. Nelson, «Occupant Behavior, Egress, and Emergency Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster,» National Institute of Standards and Technology, 2005.
- [110] D. Bruck y P. Brennan, «Recognition of Fire Cues During Sleep,» de Second International Symposium on Human Behavior in Fire, London, 2001.
- [111] J. Lynch, «Nocturnal Olfactory Response to Smoke Odor,» de Human Behaviour in Fire: Proceedings of the First International Symposium, Belfast, 1998.
- [112] K. Bayer y T. Rejnö, «Optimización de la alarma de evacuación a través de experimentos a gran escala,» Universidad Tecnológica Lund, Lund, 1999.
- [113] S. Gwynne, «Optimizing Fire Alarm Notification for High Risk Groups: Notification Effectiveness for Large Groups,» Quincy, 2007.
- [114] Dirección General de Protección Civil y Emergencias, «Avisos de Riesgos,» 2020. [En línea]. Available: <http://www.proteccioncivil.es/riesgos?inheritRedirect=true>.
- [115] SFPE Human Behavior in Fire Task Group, «Human Behaviour Assumptions Within Fire Codes and Standards,» de Guide to human behavior in Fire, 2th Edition , 2017, pp. 8-10.
- [116] G. Proulx, «Occupant Response to Fire Alarm Signals,» de National Fire Alarm Code Handbook, Quincy, MA, National Fire Protection Association, 1999.
- [117] E. Cable, «Cry Wolf Syndrome: Radical Changes Solve the False Alarm Problem,» de The Fourth National Symposium & Trade Exhibition on Health Care Safety and the Environment, 1994.

- [118] G. Proulx, J. Pineau, J. C. Latour y L. Stewart, «Study of the Occupants' Behaviour during the 2 Forest Laneway Fire in North York, Ontario, January 6, 1995,» National Research Council of Canada, Ottawa, 1995.
- [119] D. Nilsson, «Design of fire alarms: Selecting appropriate sounds,» de Interdisciplinary symposium. The Sound Environment Center, Lund, 2014.
- [120] D. Canter, D. Powell y K. Brooker, «Psychological Aspects of Informative,» Department of the Environment, Building Research Establishment, Fire Research Station, Borehamwood, 1988.
- [121] C. Cherry, «Some Experiments on the Recognition of Speech, with,» The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 25, n° 5, pp. 975-979, 1951.
- [122] R. Plamgren y J. Åberg, «Vilka ljud- och ljussignaler passar bäst som utrymningslarm? En undersökning av egenskaper hos signaler. [Which acoustic and optical signals are best suited for evacuation alarms? A study on the characteristics of signals,» Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University, Lund, 2010.
- [123] D. Nilsson, M. Johansson y H. Frantzich, «Evacuation experiment in a road tunnel: A study of human behaviour and technical installations,» Fire Safety Journal, vol. 44, n° 4, pp. 458-468, 2009.
- [124] J. J. Gibson, The Ecological Approach to Visual Perception, Boston: Houghton Mifflin Company., 1978.
- [125] A. Sixsmith, J. Sixsmith y D. Canter, «When is a door not a door? A study of evacuation route,» Safety in the built environment, 1988.
- [126] H. R. Hartson, «Cognitive, physical, sensory, and functional affordances in interaction design,» Behaviour & Information Technology, vol. 22, n° 5, pp. 315-338, 2003.
- [127] J. Bryan, «Smoke as a Determinant of Human Behaviour in Fire Situations,» National Bureau of Standards, Washington D.C, 1977.
- [128] D. Purser y J. McAllister, «Assessment of Hazards to Occupants from Smoke, Toxic Gases, and Heat,» SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, NY, 2016.
- [129] D. Purser, «Chapter 3: Hazards from Smoke and Irritants, in Fire Toxicity,» Woodhead Publishing, pp. 118-198, 2010.
- [130] D. Purser y P. Buckley, «Lung Irritation and Inflammation During and After Exposure to Thermal Decomposition Products from Polymeric Materials,» Medicine, Science and Law, vol. 23, pp. 142-150, 1983.

- [131] D. Purser, «Application of Human Behaviour and Toxic Hazard Analysis to the Validation of CFD Modelling for the Mont Blanc Tunnel Fire Incident,» Advanced Research Workshop: Fire Protection and Life Safety in Buildings and Transportation Systems, pp. 30-31, 2009.
- [132] F. Beswick, P. Holland y K. Kemp, «Acute Effects of Exposure to Orthochlorobenzylidene Malononitrile (CS) and the Development of Tolerance,» British Journal of Industrial Medicine, vol. 29, n° 3, pp. 298-306, 1972.
- [133] K. Kawagoe y H. Saito, «Measures to Deal with Smoke Problems Caused by Fire,» Journal of Japan Society for Safety Engineering, vol. 6, n° 7, pp. 108-114, 1967.
- [134] T. Jin, «Visibility through Fire Smoke - Part 5, Allowable Smoke Density for Escape from Fire,» Fire Research Institute of Japan, 1976.
- [135] K. Fridolf, K. Andrée, D. Nilsson y H. Frantzich, «The Impact of Smoke on Walking Speed,» Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University, Lund, 2013.
- [136] K. Deaux y M. Snyder, «Personality and Social Psychology,» The Oxford Handbook of Personality and Social Psychology, pp. 829-836, 2012.
- [137] American Psychiatric Association, «Diagnostic and statistical manual of mental disorders. Fifth edition,» American Psychiatric Association, Washington DC, 2013.
- [138] E. Roca, «El trastorno de pánico y su tratamiento: Terapia cognitiva focal en formato de grupo,» Psiquiatría, 2003.
- [139] El Independiente, «El Independiente,» 22 septiembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.elindependiente.com/futuro/medio-ambiente/2020/08/29/panico-en-el-incendio-del-complejo-laguna-village-de-estepona/>. [Último acceso: 22 septiembre 2020].
- [140] El Periódico, «El Periódico de Extremadura,» 20 agosto 2020. [En línea]. Available: https://www.elperiodicoextremadura.com/noticias/almendralejo/panico-incendio-zona-baja-san-marcos-almendralejo_1247136.html. [Último acceso: 22 septiembre 2020].
- [141] E. Cordeiro, A. L. Coelho, R. Rossetti y J. Almeida, «Human behavior under fire situations - Portuguese Population,» de Fire and Evacuation Modeling Technical Conference 2011, Baltimore, MA, 2011.
- [142] R. F. Fahy, G. Proulx y L. Aiman, «Panic and Human Behaviour in Fire,» de Human Behaviour in Fire Symposium 2009, Cambridge, 2009.
- [143] K. Okabe y M. Shunji, «A Study on the Socio-Psychological Effect of a False Warning of the Tokai Earthquake in Japan,» de Tenth World Congress of Sociology, Mexico City, 1982.

- [144] E. D. Kuligowski, R. D. Peacock, P. A. Reneke, E. Wiess, C. R. Hagwood, K. J. Overholt, R. P. Elkin, J. D. Averill, E. E. Ronchi, B. L. Hoskins y M. Spearpoint, «Movement on Stairs During Building Evacuations,» National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2015.
- [145] SFPE Human Behavior in Fire Task Group, «The Impact of Human Behavior on Evacuation Timing Calculations,» de Guide to Human Behavior in Fire, 2nd Edition, Society of Fire Protection Engineers, 2017, pp. 49-50.
- [146] J. Bryan y J. Milke, «The Determination of Behavior Response Patterns in Fire Situations, Project People II,» National Bureau of Standards, Washintong D.C, 1980.
- [147] M. Horasen y O. Bruck, «investigation of a Behavioural response Model or Fire Emergency Situations in Secondary Schools,» de Fourht International Symposium on Fire Safety Science, 1994.
- [148] S. Kose, «Emergence of Aged Populace: Who is at Higher Risk in Fires?,» de Proceedings of the First International Symposium, Ulster, 1998.
- [149] D. Purser, «Toxicity Assessment of Combustion Products,» SPFE Handbook of Fire Protection Engineering, 3 ed, Quincy, 2002.
- [150] R. Gann, J. Averill, K. Bulter, W. Jones, G. Mulholland, J. Neviaser, T. Ohlemiller, R. Peacock, R. P.A. y J. Hall Jr., «International Study of the Sublethal Effects of Fire Smoke on Survivability and Health (SEFS): Phase 1 Final Report,» National Institue of Standards and Tecnhonolgy, Gaithersburg, 2001.
- [151] K. E. Boyce, T. J. Shields y G. Silcock, «Toward the characterization of building occupancies for fire safey engineering: capabilities of disabled people moving horizontally and on an incline,» Fire Technology, vol. 35, n° 1, pp. 51-67, 1999.
- [152] T. Shields, B. Smyth, K. Boyce y W. Silcock, «Towards the Prediction of Evacuation Behaviours for People with Learning Difficulties,» Facilities, vol. 17, n° 9/10, pp. 336-344, 1999.
- [153] S. C. Holbum y M. J. Dougher, «The Fire-Alarm: Exit Training Using Negative and Positive Reinforcement Under Varied Stimulus Conditions,» Journal of Visual Impairment and Blindness, vol. 79, n° Nov, pp. 401-403, 1985.
- [154] T. J. Shields, B. Smyth, K. E. Boyce y G. Silcock, «Evacuation Behaviours of Occupants with Learning Difficulties in Residential Homes,» Disability and Rehabilitation, vol. 21, n° 1, pp. 39-48, 1999.
- [155] J. D. Sime, Access and Egress for the Handicapped in Public Buildings, Portsmouth: G. Harber and T. Blanks, 1987.

- [156] M. S. Wright, G. K. Cook y . G. M. B. Webber, «Emergency Lighting and Wayfinding Provision Systems for Visually Impaired People: Phase 1 of a Study,» *Lighting Research Technology*, vol. 31, nº 2, pp. 35-42, 1999.
- [157] TriData Corporation, «Fire Risks for the Blind or Visually Impaired,» US Fire Administration, Washington DC, 1999.
- [158] R. W. Shearer, «Fire Protection and Safety for the Handicapped,» *Fire Chief Magazine Communications Channels Inc.*, pp. 53-54, 1984.
- [159] Organización Mundial de la Salud, «Sordera y pérdida de audición,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/deafness-and-hearing-loss>. [Último acceso: 23 septiembre 2020].
- [160] G. Proulx, C. Laroche y J. C. Latour, «Audibility Problems with Fire Alarms in Apartment Buildings,» de *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 39th Annual Meeting*, San Diego, 1995.
- [161] J. Sime, «Movement Toward the Familiar: Person and Place Affiliation in a Fire Entrapment Setting,» *Environment and Behavior*, vol. 17, nº 6, pp. 697-724, 1985.
- [162] D. Nilsson, H. Frantzich y W. L. Saunders, «Influencing Exit Choice in the Event of a Fire Evacuation,» de *Proceedings of the Ninth International Symposium on Fire Safety Science*, Karlsruhe, Germany, 2008.
- [163] S. López Riera, «Planes de emergencia, planes de autoprotección y medidas de emergencia,» Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 2015.
- [164] G. Proulx, C. Laroche, F. Jaspers-Fayer y R. Lavallée, «Fire Alarm Signal Recognition,» National Research Council Canada, 2001.
- [165] B. Latané y J. Darley, «Group Inhibition of Bystander Intervention in Emergencies,» *Journal of Personality and Social Psychology*, vol. 10, nº 3, pp. 215-221, 1968.
- [166] J. Sime, «The Outcome of Escape Behaviour in the Summerland Fire: Panic or Affiliation?,» de *Proceedings of the International Conference on Building Use and Safety Technology*, Los Ángeles, 1985.
- [167] R. H. Turner y M. K. Ralph, *Collective Behavior*, Englewood Cliffs: Prentice, 1987.
- [168] H. Carmen, M. Fernando , G. Ángel y M. F. José, *Psicología de los grupos*, UNED, 2011, pp. 82-84.
- [169] M. Almejmaj, B. Meacham y J. Skorinko, «The Effects of Cultural Differences between the West and Saudi Arabia on Emergency Evacuation - Clothing Effects on Walking Speed,» *Fire Materials*, vol. 39, nº 4, pp. 353-370, 2014.

- [170] E. Galea, M. Sauter, S. Deere y L. Filippidis, «Investigating the Impact of Culture on Evacuation Response Behaviour,» de Proceedings of the Twelfth International Fire Science and Engineering Conference, London, 2010.
- [171] E. Galea, M. Sauter, S. Deere y L. Filippidis, «Investigating the Impact of Culture on Evacuation Behavior - A Turkish Data-Set,» Fire Safety Science, pp. 709-722, 2011.
- [172] S. Gwynne, «Conventions in the collection and use of human performance data,» National Institute of Standards and Technology, 2010.
- [173] S. Gwynne y K. Boyce, «Engineering Data,» de SFPE of Handbook Fire Protection Engineering 5th Edition, Society of Fire Protection Engineers, 2017.
- [174] C. S. Levy, J. R. Pierce, A. L. Porter, A. D. da Vitória y B. J. Meacham, «Investigation of Occupant Behaviours and Movement on Stairs,» de 6th International Symposium Human Behaviour in Fire, Cambridge, 2015.
- [175] T. Sano, M. Yajima y H. Kadokur, «Characteristics of Evacuation Behavior Based on Observation of a Total Evacuation drill in a High-Rise Building,» de 6th International Symposium Human Behaviour in Fire, Cambridge, 2015.
- [176] S. Gwynne, «Translating behavioral theory of human response into modeling Practice,» National Institute of Standards and Technology, 2012.
- [177] F. García Monzón, Estrategias de Diseño en Edificios: Accesibilidad y Seguridad frente a Incendios, Consejo Superior de Colegios de Arquitectos de España, 2008.
- [178] B. Herbert, Symbolic Interactionism: Perspective and Method., Berkley, CA: University of California, 1969.
- [179] D. Tong y D. Canter, «The Decision to Evacuate: A Study of the Motivations which Contribute to Evacuation in the Event of a Fire,» Fire Safety Journal, nº 9, pp. 257-265.
- [180] E. Kuligowski, «The Process of Human Behavior in Fires. NIST Technical Note 1632,» National Institute of Standards and Technology, 2009.
- [181] D. Canter, D. Ian y J. Chalk, «Pedestrian Behaviour during Emergencies Underground: The Psychology of Crowd Control Under Life Threatening Circumstances,» de Safety in Road and Rail, A. Vardy, Ed., Bedford: Independent Technical Conferences Ltd., 1992, pp. 135-150.
- [182] G. Gigerenzer y R. Selten, «Bounded Rationality: The Adaptive Toolbox,» Cambridge, MA: The MIT Press, 2001.
- [183] M. K. Lindell y R. W. Perry, «Protective Action Decision Model: Theoretical Modifications and Additional Evidence,» Risk Analysis, vol. 32, nº 4, p. 616-632, 2012.
- [184] T. Drabek, «Human System Responses to Disaster: An Inventory of Sociological Findings,» Springer-Verlag, 1986.

- [185] J. Sorensen y B. Vogt-Sorensen, «Community Processes: Warning and evacuation,» *Handbook of Disaster Research*, 2006.
- [186] D. Mileti y L. Peek-Gottschlich, «Hazards and Sustainable Development in the United States,» *Risk Management*, vol. 3, n° 1, pp. 61-70, 2001.
- [187] J. Turner, «Social Influence,» Pacific Grove, 1991.
- [188] M. Lindell y W. Ronald, «Communicating Environmental Risk in Multiethnic,» Thousand Oaks, 2004.
- [189] P. Slovic, B. F. y L. Sarah, «Behavioral Decision Theory,» *Annual Review of Psychology*, pp. 1-39.
- [190] D. Zakay, «The Impact of Time Perception Processes on Decision Making Under Time Stress,» de *Time Pressure and Stress in Human*, New York, 1993, pp. 59-72.
- [191] I. Janis, «Decision Making Under Stress,» de *Handbook of stress*, 1982, pp. 69-87.
- [192] H. Ben Zur y S. Breznitz, «The Effect of Time Pressure on Risky Choice Behavior.,» 1981, pp. 89-104.
- [193] G. Klein, «Sources of Power: How People Make Decisions,» The MIT Press, 1999.
- [194] D. Mileti y J. Sorensen, «Communication of Emergency Public Warnings: A social science perspective and state-of-the-art assessment,» Oak Ridge National Laboratory, 1990.
- [195] M. Lindell y W. Roland, «The Protective Action Decision Model: Theoretical modifications and additional evidence,» *Risk Analysis*, pp. 616-632, 2012.
- [196] K. Fridolf, D. Nilsson y H. Frantzich, «Fire Evacuation in Underground Transportation Systems: a Review of Accidentes and Empirical Research,» *Fire Technology*, vol. 49, pp. 451-475, 2013.
- [197] M. Kobes, B. Helsloot y P. J., «Building safety and human behaviour in fire: A literature review,» *Fire Safety Journal*, vol. 45, pp. 1-11, 2010.
- [198] B. Rothbaum, L. Hodges, R. Kooper, D. Opdyke, J. Williford y M. North, «Effectiveness of computer-generated graded exposure in the treatment of acrophobia,» *American Journal of Psychiatry*, pp. 626-628, 1995.
- [199] K. Meyerbröker y P. Emmelkamp, «Virtual reality exposure therapy in anxiety disorders: a systematic review of process and outcome studies,» *Depression and anxiety*, vol. 27, pp. 933-944, 2010.

- [200] B. Wiederhold y M. Wiederhold, «Virtual Reality Treatment of Posttraumatic Stress Disorder Due to Motor Vehicle Accident,» *Cyberpsychology Behaviour and Social Networking*, vol. 13, pp. 21-27, 2010.
- [201] M. Kobes, I. Helsloot, B. de Vries y J. Post, «Exit choice, (pre-)movement time and (pre-)evacuation behaviour in hotel fire evacuation — Behavioural analysis and validation of the use of serious gaming in experimental research,» *Procedia Engineering*, vol. 3, pp. 37-51, 2010.
- [202] J. Törnros, «Driving behaviour in a real and a simulated road tunnel - A validation study,» *Accident Analysis and Prevention*, vol. 30, pp. 497-503, 1998.
- [203] U. Ruppel y K. Schatz, «Designing a BIM-based serious game for fire safety evacuation simulations,» *Advanced Engineering Informatics*, vol. 25, pp. 600-611, 2011.
- [204] M. Kinateder, E. Ronchi, D. Nilsson, M. Kobes, M. Müller, P. Pauli y A. Mühlberger, «Virtual Reality for Fire Evacuation Research,» de *Proceedings of the 2014 Federated Conference on Computer Science and Information Systems*, Warsaw, Poland, 2014.
- [205] HTC, «Productos VIVE,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.vive.com/eu/product/#all>.
- [206] 3drudder, «PC gaming 3drudder,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.3drudder.com/pc-gaming/>.
- [207] Polar, «Runnig Polar,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.polar.com/es/productos/sport/M430-reloj-gps-running>.
- [208] M. Csikszentmihalyi y J. Nakamura, «Flow Theory and Research,» de *Oxford Handbook of Positive Psychology*, S. López y C. Snyder, Edits., 2011, pp. 195-196.
- [209] A. Shahid, K. Wilkinson, S. Marcu y C. Shapiro, «State-Trait Anxiety Inventory (STAI). In STOP, 520 THAT and One Hundred Other Sleep Scales,» Springer New York, pp. 367-368, 2011.
- [210] C. Spielberger, R. Gorsuch y E. Lushore, «STAI. State-Trait Anxiety Questionnaire,» Sección de 522 Estudios de TEA Ediciones S.A, 2010, 2010.
- [211] K. Kvaal, I. Ulstein, I. Nordhus y K. Engedal, «The Spielberger State-Trait Anxiety Inventory 524 (STAI): The state scale in detecting mental disorders in geriatric patients,» *International Journal of Geriatric Psychiatry*, vol. 20, n° 7, pp. 629-634, 2005.
- [212] Medline Plus, «Medline Plus,» 2018. [En línea]. Available: <https://medlineplus.gov/spanish/motionsickness.html>. [Último acceso: 1 septiembre 2020].

- [213] T.-R. Fernández Rodríguez, «El punto de vista ecológico y su peculiar conexión con la psicología,» *Estudios de psicología*, n° 22, 1985.
- [214] World Medical Association, «Declaración de Helsinki. Investigación médica en seres humanos,» 2013. [En línea]. Available: <https://www.wma.net/es/que-hacemos/etica-medica/declaracion-de-helsinki/>. [Último acceso: 1 septiembre 2020].
- [215] K. Stanney, «Realizing the full potential of virtual reality: human factors issues that could stand in the way,» de *Proceedings Virtual Reality Annual International Symposium 95*, Research Triangle Park, NC, USA., 1995.
- [216] B. Cuevas y L. Aguayo, «Efectos secundarios tras el uso de realidad virtual inmersiva en un videojuego,» *International Journal of Psychology and Psychological Therapy*, vol. 13, n° 2, p. 163–178, 2013.
- [217] D. Mileti, «A Normative Causal Model Analysis of Disaster Warning Response,» University of Colorado Department of Sociology., Boulder, CO, 1974.
- [218] D. Canter, J. Breaux y J. Sime., *Domestic, Multiple Occupancy and Hospital Fires*, John Wiley & Sons, 1980, pp. 117-136.
- [219] E. D. Kuligowski, «Human behavior in Fire,» de *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Fifth edition, Society of Fire Protection Engineers, 2017, pp. 2070-2114.
- [220] B. E. Aguirre, D. Wenger y G. Vigo, «A Test of the Emergent Norm Theory of Collective Behavior,» *Sociological Forum*, vol. 13, n° 2, pp. 301-320, 1998.
- [221] J. H. Sorensen, «When Shall We Leave? Factors Affecting the Timing of Evacuation Departures,» *International Journal of Mass Emergencies and Disasters*, vol. 9, n° 2, pp. 153-165, 1991.
- [222] P. A. Reneke, «Evacuation Decision Model. NIST IR 7914,» National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2013.
- [223] W. Saunders, «Decision making model of behaviour in office building in fire evacuations, PhD thesis,» Victoria University of Technology, Victoria, 2001.
- [224] V. V. M. Predtechenskiĭ y A. Milinskiĭ, «Planning for Foot Traffic Flow in Buildings,» Amerind Publishing Co, 1978.