

## 50 Simposium Nacional de Alumbrado

Valencia, 22 al 24 de Mayo del 2024

**Ponencia**



**Título del trabajo/ Title of paper:**

*Simulación avanzada de sistemas de iluminación en ambientes con humo*

**Autor/es/ Author/s:**

*Jaime Quintana<sup>1</sup>, A. Alvarez<sup>2</sup>, J.C. Martinez<sup>2</sup>, S.Mayorga<sup>2</sup>, M. Duvison<sup>2</sup>, M Jaureguizar<sup>3</sup>, M.A. Garcia<sup>3</sup>, D. Vázquez<sup>2</sup>*

**Empresa/s Company/s:**

- 1.- Universidad Europea*
- 2.- Universidad Complutense de Madrid*
- 3.- Normagrup*

**Dirección principal/ Mail address:**

*Facultad de Óptica y Optometría  
C/ Arcos del Jalón 118  
28037 Madrid*

**Tema:** (indicar sólo 1) 15

## Resumen

Las edificaciones se construyen para albergar actividades humanas en condiciones de comodidad, seguridad y sostenibilidad. Aquellos edificios en los que por diversos motivos existe una concurrencia de personas debe contemplar no solamente la función primaria para la que se idearon si no que, además, es necesario que lo hagan en las mejores condiciones de seguridad posibles, a este fin la empresa Normagrup y Normalux y la Universidad Complutense de Madrid han desarrollado, en este trabajo, una metodología que permite el diseño optimizado de luminarias de emergencia teniendo en cuenta el comportamiento óptico del humo y la percepción del observador en dichos casos.

Las condiciones en las que esos espacios se convierten en un peligro latente para sus ocupantes ocurren, afortunadamente, muy rara vez e incluso nunca y, no obstante, es necesario prever dicha circunstancia como si realmente fuera a suceder al igual que un barco debe llevar el equipamiento para un supuesto naufragio con la esperanza de no tener que usarlo nunca. Una de esas circunstancias críticas y peligrosas se da cuando un incendio propaga el humo por las instalaciones de un edificio. Los espacios con humo dificultan terriblemente o incluso anulan la percepción de los distintos elementos que conforman el medio, en concreto, en la percepción de obstáculos y en la búsqueda de rutas de escape, lo cual lo hace todavía más peligroso debido a la generación de pánico y la toma de decisiones incorrectas. Disponer un sistema de iluminación que optimice el rendimiento visual en esos casos puede suponer la diferencia entre la vida y la muerte para aquellos que ocupan el mismo. En este trabajo se ha estudiado el comportamiento óptico del humo y se ha desarrollado un sistema de cálculo y simulación de la luz para ambientes con humo.

## Introducción

Como hemos comentado, el humo está compuesto principalmente por gases (como por ejemplo vapor, monóxido y dióxido de carbono, los cuales son transparentes a la luz visible), por partículas como hollín (principalmente de color negro y con una emisividad aproximada de 0.95) y gotas condensadas (generalmente blancas o, en su defecto, ligeramente coloreadas) (4). La composición del humo exhibe similitudes significativas entre los diferentes tipos de humo que podemos encontrar en un incendio, sin embargo, varía en función del material combustible y las condiciones de combustión, lo cual plantea interrogantes sobre las diferencias entre los distintos materiales.

Teniendo esto en cuenta, es posible realizar una distinción general entre dos categorías de humos: aquellos de tono "negro", que tienden a contener una mayor concentración de partículas de hollín, y humos de tono "blanco", que están asociados con la presencia de pequeñas gotas condensadas en suspensión. Es cierto que los materiales plásticos tienden a generar humos de tono más oscuro, mientras que materiales como la madera o los textiles tienden a producir humos de tono más claro. Sin embargo, es importante señalar que la tonalidad de los humos durante la combustión está estrechamente relacionada con la eficiencia y las condiciones en las que se produce este proceso.

Cuando la combustión es completa y eficiente, se libera más calor y los componentes del material se descomponen y reaccionan de manera más completa. Esto conduce a la formación de partículas más pequeñas y menos densas que tienden a formar pequeñas gotas condensadas, dando lugar a humos de color blanco.

En contraste, en una combustión incompleta o menos eficiente, los componentes del material pueden no descomponerse completamente y generar partículas más grandes y densas, como el hollín. Estas partículas absorben y dispersan la luz de manera diferente, lo que resulta en la formación de humos de color negro o blanco (ver Figura 1) (4,5).



*Fig.1.- Diferente humo generado en un proceso de combustión abierto: negro (izquierda) y blanco (derecha)*

Como ya se ha comentado anteriormente, la difusión de Mie describe cómo la luz interactúa con las partículas y guarda una estrecha relación con el índice de refracción de las partículas involucradas (1). Esta interacción entre ambas se manifiesta claramente en situaciones en presencia de humo, donde encontramos diferentes partículas dependiendo de la composición. El índice de refracción es una medida de cuanto se desvía la luz cuando pasa a través de un material. En el contexto de la dispersión de Mie, este parámetro influye en la magnitud en la que se dispersa la luz, por lo tanto, partículas con diferentes índices desviarán la luz de diferentes maneras (2,3).

Partículas como el hollín poseen un índice de refracción que, aunque puede variar en función de la longitud de onda, en el visible es aproximadamente constante (6,7). En el caso de los gases, tanto el monóxido como el dióxido de carbono y el vapor tiene índices de refracción muy cercanos a 1, es decir, muy similares al del aire (8,9). Las gotas condensadas en el humo son partículas que se forman cuando los gases calientes que se producen durante la combustión entran en contacto con el aire más frío. Estas gotas pueden estar compuestas de una gran variedad de sustancias debido a la

complejidad del humo y las variaciones en la composición de las gotas, lo que hace difícil conocer su índice de refracción (4).

Las partículas con índices de refracción similares al del aire, como es el caso de los gases, tienden a dispersar la luz de manera menos significativa. Por otro lado, las partículas con índices mayores, como el hollín y algunas gotas condensadas, dispersarán la luz en múltiples direcciones. Teniendo esto en cuenta, en un ambiente con humo la dispersión de la luz es influenciada principalmente por las partículas de hollín y las gotas condensadas. En conjunto, estas partículas suspendidas en el humo juegan un papel esencial en la interacción de la luz con el humo.

La luz visible al atravesar las partículas de humo se reduce a través de dos mecanismos, la absorción y la dispersión. Estos dos mecanismos interactúan de forma distinta con las diferentes partes de la composición del humo nombradas anteriormente. Sin embargo, en el caso de la dispersión depende principalmente del tamaño de las partículas en comparación con la longitud de onda. Esta dispersión es la que confunde la percepción visual, sobre todo en humos “blancos”. La luz directa no dispersada es entonces la que nos permite reconocer las salidas de emergencia (4).

El humo, así como la niebla, actúa como un medio dispersor de la luz, por lo que estos medios interactúan de una forma muy similar. Al difundirse un haz por el humo, se generan diversos efectos que contribuyen a la disminución de la percepción visual del entorno. Entre estos factores se encuentran la pérdida de contraste, la luminancia de velo y el deslumbramiento. Estos fenómenos son resultado de la interacción de la luz con las partículas suspendidas en el humo, lo que afecta la claridad y nitidez de la visión en ambientes con estas condiciones particulares.

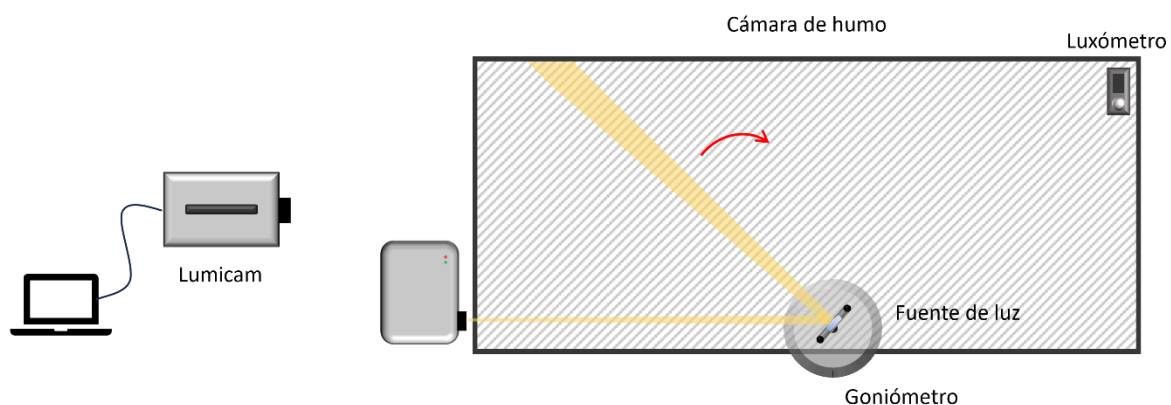
La luminancia de velo es un efecto óptico que se produce en presencia de medios dispersivos y que afecta a la percepción visual del entorno. En este fenómeno la luz se esparce o dispersa de manera desigual en diferentes direcciones. Este fenómeno ocurre debido a la interacción de la luz por las partículas suspendidas en el humo, lo que resulta en una distribución de luz difusa en todas las direcciones. Puede disminuir la claridad y la nitidez de la visión, dificultando la percepción de detalles y afectando a la seguridad y orientación en entornos (10).

Como ya hemos comentado, el humo está formado por partículas en suspensión que dispersan la luz en múltiples direcciones y que, por lo tanto, es un ambiente dispersivo de luz. Esta dispersión genera una disminución del contraste entre los objetos del campo visual, lo que dificulta distinguir formas, detalles o, en el caso de un incendio, reconocer obstáculos o zonas de evacuación. Cuanta más densidad de humo haya, más dispersión y por lo tanto, mayor pérdida de contraste (10).

El luminancia de velo es un fenómeno que provoca molestia o disminución en la capacidad para distinguir objetos debido a la presencia de una intensidad luminosa excesiva. Cuando la luz incide en ellas se dispersa a múltiples direcciones, creando fuentes adicionales de luz difusa que contribuyen al deslumbramiento en un ambiente dispersivo, ya sea humo, niebla, polvo, etc. (10,11).

## Materiales y métodos

El presente trabajo se centra en el estudio de cómo se propaga la luz a través del humo teniendo en cuenta la estructura y composición del humo. Para ello se han realizado pruebas experimentales en un entorno controlado y posteriormente simulaciones del mismo, teniendo en cuenta factores como la densidad óptica, la función de fase (Scattering), etc. El objeto del presente trabajo consiste en realizar una caracterización óptica precisa del humo real y con esta información explorar y comprobar la posible mejora de la visibilidad/contraste en espacios con humo empleando fuentes de luz inteligentes, es decir, fuentes que sean capaces de iluminar una superficie relevante, necesarias para identificar obstáculos y vías de evacuación. Controlando la intensidad y distribución espectral del haz, se reducen los efectos de difusión provocados por el humo, por lo que la percepción del entorno será mejor, en concreto el contraste de la misma con respecto al fondo.



*Fig.2.- Montaje experimental para la medida de la función de fase espectral.*

Se ha llevado a cabo la medida de la atenuación espectral del humo en una cámara realizada para la medida de la atenuación espectral y la función de fase (Fig 2). Para ello se ha procedido a la generación de humo de diversos materiales fácilmente localizables en las edificaciones actuales como: madera, caucho, poliuretano, algodón, poliestireno.

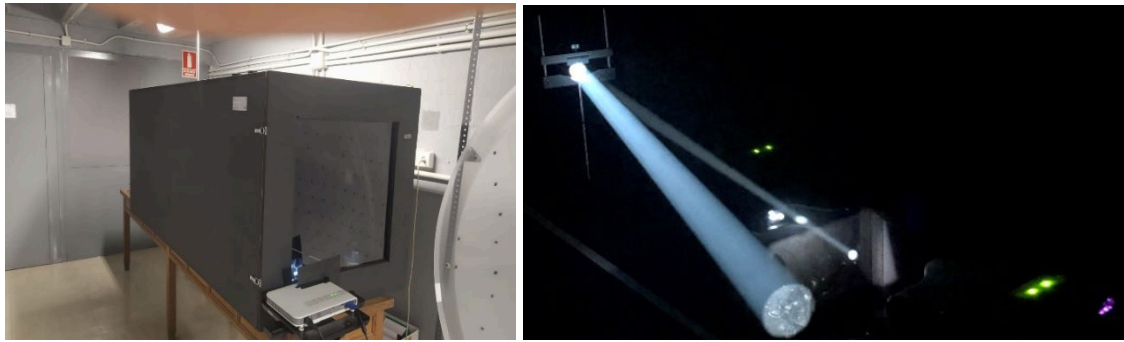


Fig.3.- Cámara de humo. Interior de la cámara de humo

Se ha fabricado un sistema multispectral de emisión de luz, acoplado a un goniómetro motorizado, que ha permitido realizar un modelo de propagación y dispersión de la luz en medios con humo en función del ángulo con respecto al observador (Fig 3). Este modelo consiste en la aplicación de la ley de Lambert-Beer 1, para evaluar la variación de intensidad debido al coeficiente de extinción, y a la variación angular, conocido como función de fase (Fig 4 y 5),



Fig.4.- Sistema multispectral de caracterización de humo

$$P(\theta) = \frac{I(\theta)}{I_0},$$

donde  $I_0$  corresponde a la intensidad inicial en la dirección de propagación en un determinado punto e  $I(\theta)$  es la intensidad función del ángulo de propagación.

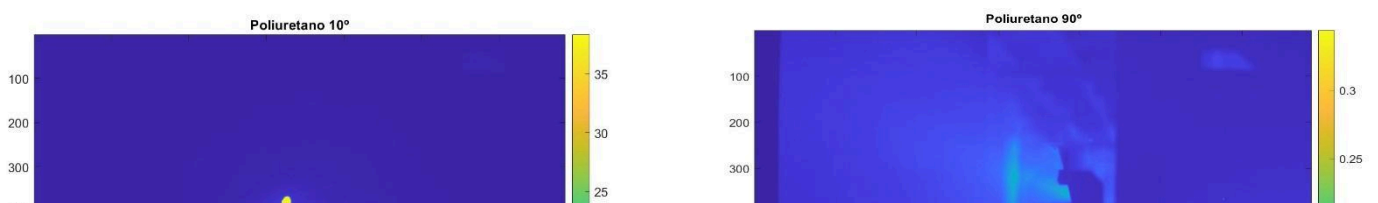


Fig 5: Variación angular del sistema multiespectral.

Por último, se ha realizado un software, basado en la ley de Labert-Beer, capaz de simular diferentes condiciones y espacios, con el objetivo de evaluar la mejora en visibilidad que presentarían sistemas de iluminación específicos para ambientes con humo, simulando el comportamiento de la luz en el medio y ofreciendo como resultado una recreación de qué es lo que percibiría un sujeto en dicha situación (Fig.6).

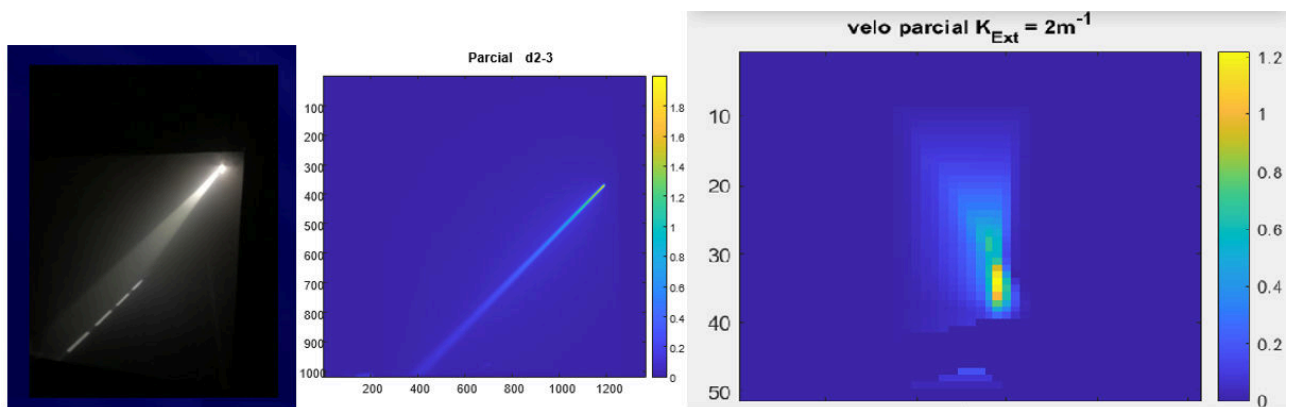


Fig.5.- Simulación de un haz de luz recto (izquierda) y una luminaria (derecha) en un ambiente con humo

Para la caracterización del comportamiento óptico del humo es necesario caracterizar espectralmente la forma en la que la luz se dispersa en el espacio y la manera en que es absorbida por el medio. En primer lugar, se ha medido la absorptancia espectral del humo de varios materiales. La Ley de Lambert-Beer cuantifica la relación entre la luz absorbida con las propiedades del material atravesado. Despejando de dicha ecuación podemos obtener el coeficiente de absorción  $\alpha$ .

$$\alpha_{\lambda} = \log\left(\frac{I_{\lambda}}{I_{0\lambda}}\right) \cdot \frac{1}{L}$$

Donde:

$I_0$ : intensidad inicial de luz incidente.

$I_{\lambda}$ : intensidad de luz transmitida.

$L$ : longitud del medio absorbente.

$\alpha$ : coeficiente de extinción

Esta ley dice que cuando un rayo de luz pasa a través de un medio absorbente, su intensidad disminuye exponencialmente a medida que la concentración del medio absorbente aumenta. Se ha realizado el siguiente montaje experimental para la realización de las medidas (Fig 6).

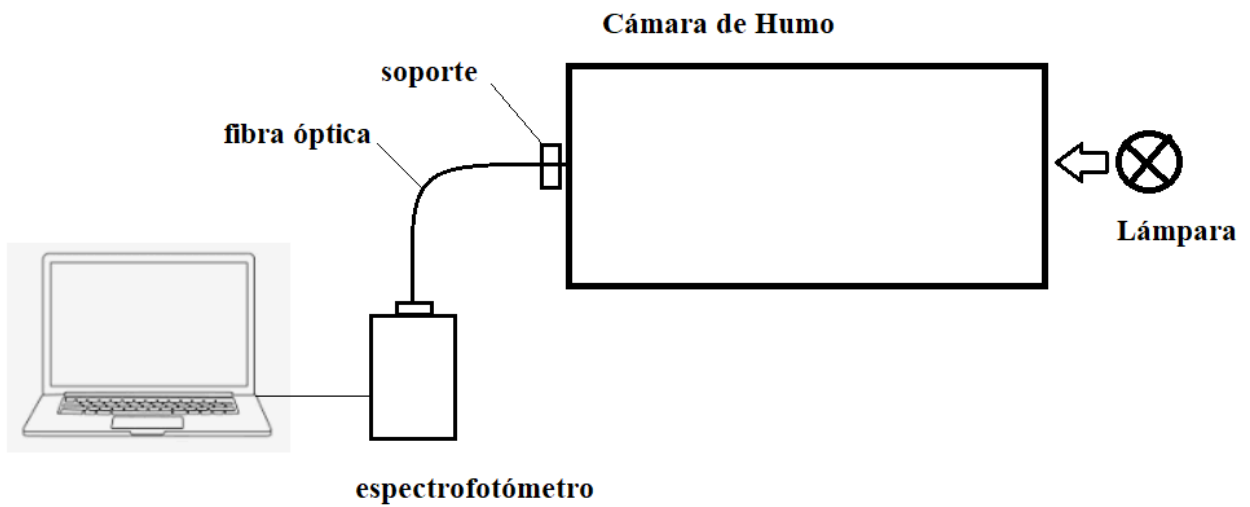


Fig.6.- Montaje experimental para la medida de la absortancia espectral del humo.

## Resultados

Dado que el valor absoluto del coeficiente de absorción depende de la concentración del humo, para poder establecer una comparativa y estudiar el comportamiento espectral se ha normalizado el resultado, obteniendo los valores de la figura 7.

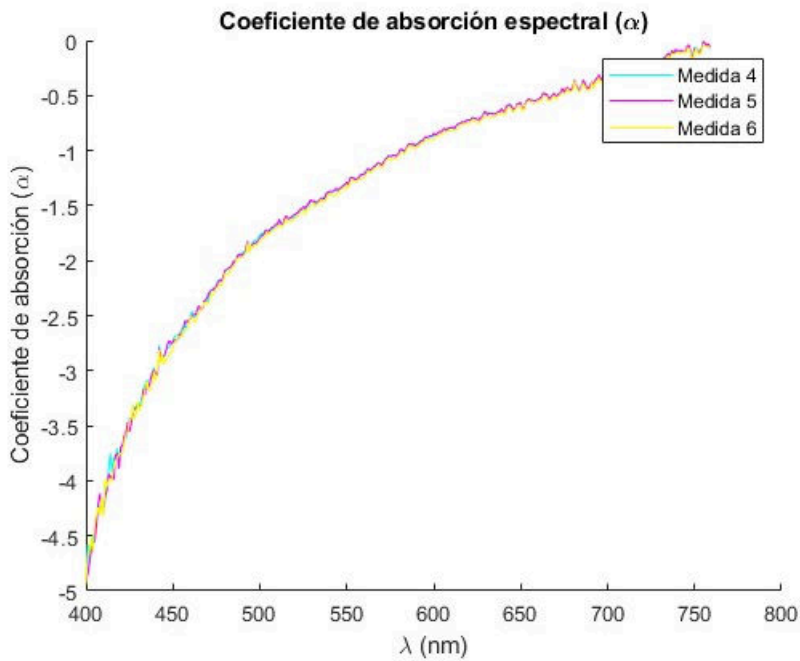


Fig. 7.- Coeficiente absorción espectral del caucho

Para la medida de la función de fase también se han utilizado el humo de 4 materiales básicos: madera, algodón, caucho y poliuretano (Fig 8).



Fig. 8.- Generación de humo para los materiales seleccionados: madera (A), algodón (B), caucho (C) y poliuretano (D).

Para la función de fase se ha procesado la información obtenida con el montaje de la figura 1 y se han obtenido los valores expuesto en la figura

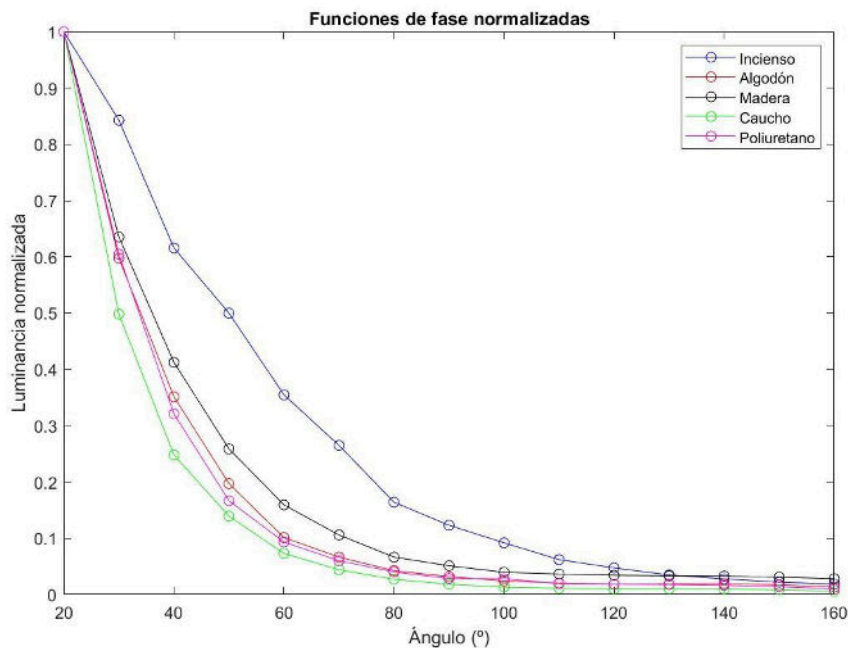


Fig.9.- Funciones de fase del humo para los materiales analizados.

Como se puede apreciar en la figura 9 todos los materiales presentan una función de fase bastante similar salvo quizás el obtenido para el incienso. Ello pudiera ser debido a que se trata de un humo menos denso y más alejado de la realidad que el del resto de los materiales.

## Conclusiones

Se ha realizado una caracterización óptica del humo real de un incendio pudiendo determinar su función de fase espectral y la absortancia espectral, lo cual permite realizar, desde el punto de vista óptico, simulaciones precisas del comportamiento de los sistemas de iluminación en caso de incendio. Dichas herramientas son una base fundamental para la optimización de la iluminación de emergencia en ambientes con humo y pueden ser un elemento clave para conseguir ratios de supervivencia mucho más elevados que los actuales.

En la actualidad se están diseñando sistemas optimizados teniendo en cuenta la anterior información y se están poniendo a punto ensayos reales en ambientes a escala 1:1 de dichos productos. La figura 10 muestra un ensayo con humo real en un espacio real bajo control realizado en el centro de formación de bomberos sito en la Comunidad de Madrid.



Fig.10.- Ensayo de validación óptica del comportamiento del humo en un espacio real.



Fig.11.- Propagación del humo en un espacio real en modelo de escenario contenido

En la figura 11 se puede apreciar cómo es la propagación del humo en un espacio real conectado con un espacio en el que se encuentra la combustión del material. En la figura 12 se muestra el ensayo realizado simulando un caso de máxima emergencia en el cual el foco de combustión ya descontrolado se encuentra en el propio local de estudio.



Fig12.- Propagación del humo en un espacio real en modelo de escenario de máxima emergencia

## Agradecimientos

Este proyecto ha sido realizado gracias al Soporte humano y económico de la empresa Normagrup y a la financiación del proyecto de investigación IDE\_2023\_000295 de la Agencia Sekuens-Principado de Asturias.

## Referencias

1. Gredos. Dispersión de Luz. Repositorio Documental de la Universidad de Salamanca. 2009 Oct 13;
2. Wampfler GL. Light-Transmitting and Light-Scattering Properties of Smoke. Minnesota; 1966 Jun.
3. Meyer ME. Particle Morphology and Elemental Composition of Smoke Generated by Overheating Common Spacecraft Materials [Internet]. Cleveland, Ohio; 2015 Dec. Available from: <http://www.sti.nasa.gov>
4. Coppa P, La Malfa A. Light Extinction by Fire Smokes. J Fire Sci. 1997;15:180–202.
5. Yonemitsu K, Sasao A, Oshima T, Mimasaka S, Ohtsu Y, Nishitani Y. Quantitative evaluation of volatile hydrocarbons in post-mortem blood in forensic autopsy cases of fire-related deaths. Forensic Sci Int. 2012 Apr 10;217(1–3):71–5.
6. Dalzell WH, Sarofim AF. Optical Constants of Soot and Their Application to Heat-Flux Calculations. J Heat Transfer [Internet]. 1969 Feb 1 [cited 2023 Aug 20];91(1):100–4. Available from: <https://dx.doi.org/10.1115/1.3580063>

## 50 Simposium Nacional de Alumbrado

Valencia, 22 al 24 de Mayo del 2024

### **Ponencia**



7. Query MR. Optical Constants of Minerals and Other Materials from the Millimeter to the Ultraviolet. Chemical Research D& ECUSAAMCC, editor. Missouri-Kansas; 1998 Nov.
8. Bideau-Mehu A, Guern Y, Abjean R, Johannin-Gilles A. Interferometric determination of the refractive index of carbon dioxide in the ultraviolet region. *Opt Commun.* 1973 Dec 1;9(4):432–4.
9. Smith PL, Parkinson WH, Huber MCE. Refractivities of H<sub>2</sub>, He, O<sub>2</sub>, CO, and Kr for 168-288 nm wavelength range. *Phys Rev A Gen Phys.* 1976;
10. Khan TQ, Bodrogi P, Vinh QT, Winkler H. *LED Lighting: Technology and Perception.* 1st ed. Wiley-VCH, editor. 2014.
11. Ikaunieks G, Colomb M, Ozolinsh M. Light scattering in artificial fog and simulated with light scattering filter. In: *Ophthalmic and Physiological Optics.* Blackwell Publishing Ltd; 2009. p. 351–6.