

Un paso más allá del triángulo y el tetraedro.

El modelo QF7 para el conocimiento del fuego

Pablo Nestares-Pleguezuelo¹, Juan Carlos Rubio-Romero², M^a Dolores Martínez-Aires¹, Luis Parras-Angueta²

¹ Universidad de Granada

² Universidad de Málaga

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7174>

RESUMEN

Históricamente se han utilizado modelos gráficos sencillos para describir la combustión y el proceso del fuego. El *Triángulo del fuego*, y sus variantes, el Tetraedro del fuego y el Pentaedro del fuego, son algunos de estos modelos. Sin embargo, ninguno de ellos considera características como el color, del que la llama es un caso particular. En esta comunicación corta, basándonos en el modelo del plano proyectivo finito P7 - plano proyectivo con sólo 7 puntos y 7 rectas (por cada punto pasan 3 rectas y cada recta tiene 3 puntos) - se explica un nuevo modelo de conocimiento para el fuego denominado QF7 que explica el triángulo de la combustión y 7 tipos de fuego diferentes, cada uno de ellos basado en 3 de las 7 propiedades químico-físicas elementales que caracterizan cualquier fuego.

1. INTRODUCCIÓN A LOS MODELOS DE REPRESENTACIÓN DEL FUEGO

En la bibliografía existen diferentes modelos desarrollados para ayudar a explicar la dinámica de la combustión, el fuego y las explosiones. De entre ellos, destaca sin duda el Triángulo del fuego ya introducido por el propio Faraday en 1861 [1]. Los elementos que conforman este modelo son: **el combustible, el oxígeno y la energía**; según este modelo, los tres elementos que han de coexistir para que haya combustión [2]. De hecho, lo que se llama Triángulo de fuego, debería ser llamado sólo Triángulo de combustión ya que, además del combustible, el oxidante y la energía, la existencia de fuego implica la de otros elementos como el humo, la llama, la variación del flujo de calor, etc. Por tanto, el Triángulo del fuego es un modelo de conocimiento incompleto del fuego.

Por esta razón, el Triángulo del fuego ha sido modificado en sucesivas ocasiones. Por ejemplo, para el caso de las explosiones [3,4], se introdujo en el lado del combustible el tamaño de las partículas y la concentración para ayudar a explicarlas [5]. Kauffman [7] propuso el Pentágono para las explosiones que expande el Triángulo del fuego para

incluir la mezcla del combustible, el oxidante y el confinamiento de la mezcla (ver Figura 1).

Una nueva mejora del triángulo consistió en incorporar la tercera dimensión de forma que se pasó de un triángulo a un tetraedro: el Tetraedro del fuego. Este modelo introdujo una reacción química en cadena desinhibida [6].

Mientras que el Triángulo del fuego es útil en la enseñanza de los elementos básicos de fuego, los fenómenos observados y la investigación llevada a cabo sobre la teoría del fuego, sugieren una reacción más complicada que tiene lugar dentro de la llama que se puede explicar simplemente con el Triángulo del fuego [8]. El estudio de la combustión, ni siquiera el fuego, es un tema complejo que incluye una serie de disciplinas como la mecánica de fluidos, calor y transporte de masa y la cinética química. El estudio del fuego es aún más difícil. Es un fenómeno físico y químico que es fuertemente interactivo por naturaleza. Las interacciones entre la llama, su combustible y los alrededores pueden ser fuertemente no lineales, así como la estimación cuantitativa de los procesos involucrados es a menudo compleja [9]. Por ello avanzar en modelos de representación del fuego resulta interesante a efectos de facilitar la comunicación del proceso. En este sentido el modelo que se presenta introduce la llama y el color de ésta, además del humo.

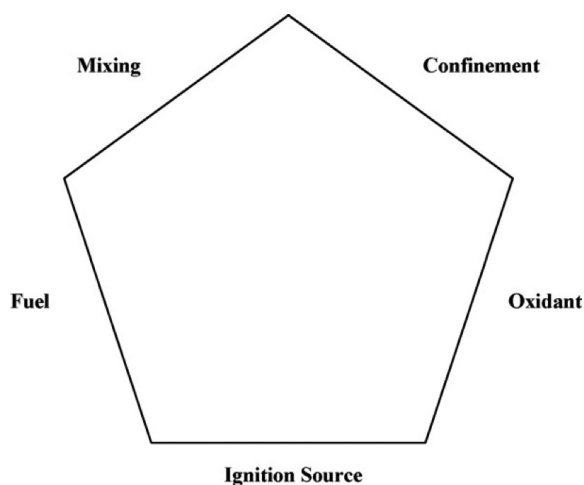


Figura 1: Pentágono para las explosiones

Fuente: [7]

2. QF7 EL MODELO DE 7 LADOS PARA EL CONOCIMIENTO DEL FUEGO

El modelo QF7 de 7 lados para el conocimiento del fuego QF7 que se propone en este trabajo está basado en la Geometría Proyectiva Finita [10], concretamente, en el plano proyectivo de 7 puntos (ver Figura 2).

En el plano representado en el modelo QF7 hay 7 puntos y, por el principio de dualidad, 7 rectas. Por otro lado cada recta contiene 3 puntos y, también por el mismo principio de dualidad, por cada punto pasan 3 rectas.

El análisis de cada una de las rectas del modelo QF7 permite describir de

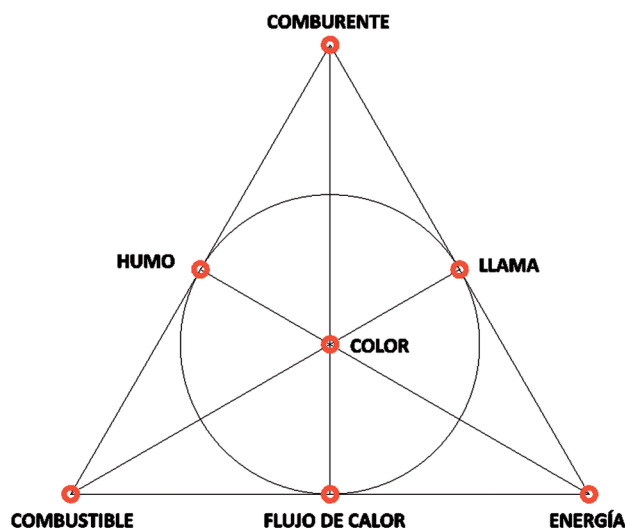


Figura 2: Representación del modelo QF7 de 7 lados de conocimiento del fuego

forma simple, partes del proceso y la dinámica del fuego incluyendo características hasta el momento no consideradas en modelos anteriores, como la llama o el color. Las siete rectas que componen el modelo son:

RECTA 1:

COMBUSTIBLE – HUMO – COMBURENTE

RECTA 2:

COMBURENTE – LLAMA – ENERGÍA

RECTA 3:

ENERGÍA – FLUJO DE CALOR – COMBUSTIBLE

RECTA 4:

COMBUSTIBLE – COLOR – LLAMA

RECTA 5:

COMBURENTE – COLOR – FLUJO DE CALOR

RECTA 6:

ENERGÍA – COLOR – HUMO

RECTA 7:

LLAMA – HUMO – FLUJO DE CALOR

Los cortes de las tres primeras rectas conforman el Triángulo de la combustión. El corte de las rectas cuatro, cinco y seis añaden el color como nueva característica del fuego. El corte de la recta 7 con las restantes incluye los elementos no incluidos en el Triángulo del fuego.

Veamos a continuación una breve descripción cualitativa que cada recta permite hacer en términos de explicación cualitativa simple sobre el fuego.

Recta 1.

Combustible-Humo-Comburente

Esta es una de las líneas del Triángulo de combustión. Para que un proceso de combustión se lleve a cabo se nece-

sitan combustible y oxidante, además de una cantidad inicial de energía. Si el combustible es un hidrocarburo gaseoso puro, los productos de reacción serán CO_2 y agua que no son visibles. En el caso de combustibles sólidos o líquidos, cuando se somete a altas temperaturas debido al proceso de la combustión, se crean primero los componentes volátiles por carbonización o pirólisis, que se queman produciendo llamas. Se puede definir el humo como la visualización de los productos de reacción y está compuesta básicamente por el hollín (carbón no quemado), aceites, alquitrán y cenizas (minerales y sales en el combustible) y su composición dependerá de la relación combustible-oxidante y la composición química exacta del combustible [9]. Para valores bajos de la fracción de mezcla de la reacción no hay suficiente oxígeno para reaccionar con todo el combustible, de modo que la reacción no será completa y habrá hollín (humo negro).

Recta 2.

Comburente-Llama-Energía

La llama puede ser descrita como la parte visible del fuego, que marca la región aproximada en la que se produce la reacción química de combustión, en la que se libera calor y la luz. Esta llama se propaga a través de los productos de reacción a una velocidad determinada llamada *Velocidad de quemado*. El color de la llama dependerá en gran medida del espectro de emisión de los diferentes productos de reacción presentes en el proceso de combustión [11]. Aunque

la energía del fuego dependerá del proceso de combustión, su llama, que es una característica del fuego, estará vinculada éste y a la relación de combustible-oxidante para una cantidad dada de combustible. Típicamente, variando la relación combustible-oxidante, cambiará el color de la llama, su forma y la temperatura máxima de la misma [11]. Para las mezclas de hidrocarburos con aire, mezclas de combustión ricas en combustible (menos aire del correspondiente al valor estequiométrico), producirán llamas amarillas debido a la combustión del hollín, que generalmente usa el resto del oxidante necesario para el proceso de combustión de los alrededores de la llama. Éstas se llaman las *Llamas de difusión*, que son mayores y tienen un comportamiento más inestable (esas son las llamas típicas presentes en un incendio, en las que el combustible está completamente separado del oxidante). En general, cuando el oxidante se mezcla con el combustible que se llaman *llamas premezcladas* que producen llamas azules, que tienen alturas inferiores y son más estables que sus contrapartes de difusión. Estas llamas se utilizan para aplicaciones industriales como la soldadura, pero pueden estar presentes en el fuego si la cantidad de aire de infiltración es suficiente como para mezclarse con el combustible. Mezclas estequiométricas (con la cantidad exacta de oxidante necesaria para quemar el combustible mezclado con él) tendrán la temperatura máxima en la llama [11]. En un caso intermedio, en algunas regiones las llamas serán premezcladas y en la parte superior de la llama se comportará como una llama de difusión (por ejemplo la llama de un mechero).

Recta 3.

Energía-Flujo de Calor-Combustible

Como hemos indicado anteriormente, la energía liberada por un incendio dependerá de la entalpía de reacción del combustible, y la relación de combustible-oxidante. La Velocidad de Liberación de Calor (*Heat Release Rate* en inglés) producida por un incendio dependerá de la forma en que la energía liberada se transfiere a los alrededores. Hay tres mecanismos principales de transferencia de calor: conducción, convección y radiación [9]. La conducción hace referencia a la transferencia de calor a un sólido, que es la causa de la fusión de los materiales en un incendio

cerrado. La convección se corresponde con la transferencia de calor desde el fuego hacia el fluido que lo rodea. Esto dependerá de la diferencia de temperatura y un coeficiente de película que depende del flujo inducido. Velocidades más altas producen mayores tasas de transferencia de calor. La radiación es el principal mecanismo de transferencia de calor en incendios. Esto dependerá de la temperatura del fuego elevada a la cuarta (Modelo de radiación de Boltzman). Este calor se intercambiará con todas las superficies alrededor de la llama. También los gases producidos pueden ser participativos (pueden intercambiar energía con el fuego), si no son transparentes a la radiación (ver [9] para los modelos más detallados).

Recta 4.

Combustible-color-llama

El color de la llama del fuego está relacionada de dos formas distintas con el combustible. La primera de ellas es complementaria a la que se ha indicado en la Línea 2. El color de la llama dependerá de la relación combustible-oxidante (ver [11] y [12]). Para mezclas de hidrocarburos con aire, una combustión pobre dará lugar a colores violeta oscuro, debido a la excitación de los radicales CH. Si la mezcla es rica en combustible, aparecerá una radiación verde debido a la excitación de las moléculas de C_2 . Si la temperatura de los gases es alta, los gases quemados muestran un color rojo, debido a la excitación de CO_2 . Para mezclas muy ricas, puede aparecer una intensa radiación amarilla directamente vinculada a la presencia de partículas sólidas de carbono (hollín), que son características de las llamas de difusión. Por otro lado, el combustible puede tener un impacto profundo en el color de la llama, puesto que los aditivos en el combustible pueden cambiarlo debido a la excitación de dichas moléculas. Este efecto se ha utilizado en aplicaciones pirotécnicas en las que los aditivos de sales se usan para cambiar el color de las llamas. Además, los incendios de plástico producen diferentes colores de la llama debido a los colorantes añadidos.

Recta 5.

Comburente-color-flujo de calor

Esta línea puede ser vista como una mezcla de líneas 2 y 3. El oxidante

puede controlar el color de la llama y el calor liberado como se ha indicado en la línea 2. El calor liberado es evacuado al ambiente (Línea 3) mediante la transferencia del calor de manera que una mayor energía producirá temperaturas más altas y mayores tasas de transferencia de energía a los alrededores del fuego.

Recta 6. Energía-Color-Humo

Para un ingeniero del fuego el humo es el primer elemento visible del mismo. Como se ha indicado previamente, el humo dependerá de la composición química del combustible y la relación combustible-oxidante, aunque desde un punto de vista aplicado es interesante relacionar el color con la energía liberada. Una combustión estequiométrica reaccionará con todo el combustible dando la máxima energía liberada por unidad de combustible y habrá menos hollín en el humo, por lo que no tendrá un color negro profundo, y el color dependerá de la composición del propio combustible. Todos los elementos de la mezcla de combustible oxidante o que no reaccionan produciendo calor reducirán la energía liberada debido a que extraen la energía del fuego. En incendios cerrados, donde no hay oxígeno suficiente como para quemar todo el combustible, por lo general el humo presenta un color negro debido a la presencia de hollín. El aire introducido en el fuego aumentará la combustión de estos productos no quemados y la energía liberada por el fuego aumentará.

Recta 7.

Llama-humo-Flujo de Calor

Esta última línea incluye tres características típicas de fuego y se podría llamar la Línea proyectiva de fuego. Un proceso de combustión en sí mismo, generalmente no implica fuego. Puede ocurrir sin humo, llama y sin variación apreciable del calor. Así que esta línea es lo que realmente diferencia a este modelo del fuego QF7 desde el triángulo de combustión [1] y, por tanto, lo que hace que la diferencia principal entre el fuego y la combustión. La relación entre ellos está profundamente ligada al triángulo de combustión y se han comentado en las líneas anteriores.

3. CONCLUSIONES

Si bien ninguno de los modelos de representación gráfico del proceso del fuego permite una explicación completa del mismo, los modelos tradicionales como el triángulo y el tetraedro del fuego no incorporan características claves explicativas de la dinámica del fuego como el humo, la llama y el color. El modelo que se presenta incorpora estas características y puede ayudar a educadores, profesionales y científicos a expresar de forma sencilla la dinámica del fuego y su comportamiento.

PARA SABER MÁS

- [1] Drysdale, (1998): An introduction to fire dynamics Wiley-Blackwell, England. Sciences (Second Edition) 2013, Pages 161-166.
- [2] Stauffer, E, NicDaéid, N. (2013): Quemistry of Fire. Encyclopedia of Forensic.
- [3] Hughes, A. J., & Raybould, W. E. (1960). Rapid determination of the explosibility of mine fire gases. Mining Engineer, 120(1), 37-53.
- [4] Otasek, F., & Bajer, M. (1963). Inertization of methane-containing atmosphere in coal mines (in Czech). Prague and Bratislava: SNTL and SVTL.
- [5] Amyotte, P.R., Eckhoff, R.K. (2010): Dust explosion causation, prevention and mitigation: An overview. Journal of Chemical Health & Safety, 1871-5532, doi:10.1016/j.jchas.2009.05.002.
- [6] Corry, R.E. (2002): Fundamentals of Fire Investigation. Handbook on Firesetting in Children and Youth Copyright 2002, Elsevier Science (USA).
- [7] Kauffman, C. W. Fuel-Air Explosions; Lee, J. H. S. & Guirao, C. M. Ed., Fuel-Air Explosions; University of Waterloo Press: Waterloo, ON, Canada, 1982p. 305-347.
- [8] Beard, A. N. (1997). Fire models and design. Fire Safety Journal, 28(2), 117-138. doi:DOI: 10.1016/S0379-7112(96)00082-3.
- [9] Karlsson, B y Quintiere, J.G. (2000): Enclosure Fire Dynamics. CRC. Press Limited.
- [10] Cederberg, J. N.; "A Course in Modern Geometries", Springer-Verlag, 2001.
- [11] Glassman, I. and Yetter, R.A. Combustion. Academic Press. 2008.
- [12] McAllister, S., Chen, J.Y. and Fernandez-Pello, A.C. Fundamentals of combustion processes. Springer-Verlag. 2011.