

¿Por qué puede apagarse una llama aunque quede combustible?

Juan Segurola · Todos los derechos reservados

QUE · Artículo 023 · Preguntas sencillas, respuestas profundas · Versión 0.1 ES

Que quede combustible nos dice que no se ha agotado un posible reactivo. No nos dice que una llama pueda mantenerse. La combustión sostenida requiere que los reactivos lleguen a una región de reacción, reaccionen con suficiente rapidez y conserven las condiciones térmicas y químicas que permiten continuar el proceso. Una llama puede desaparecer cuando falla ese proceso acoplado aunque siga habiendo material combustible cerca.

La pregunta trata del mecanismo de extinción, no de un procedimiento para manejar un fuego. Los distintos combustibles, geometrías y entornos tienen límites diferentes. La presencia de un fragmento de combustible sin consumir no permite deducir una temperatura o concentración de oxígeno única.

1. Un inventario de combustible no es una velocidad de reacción

Una llama es un proceso en curso. Su persistencia depende de lo que sucede por unidad de tiempo, no solo del material total disponible. Un gran inventario de combustible puede coexistir con un pequeño suministro de vapor combustible a una región de reacción en fase gaseosa, o con condiciones en que las reacciones no pueden reponer la energía que se pierde.

En una llama asociada a un sólido, la transferencia de calor al material puede ayudar a generar vapor de combustible. Parte del calor transferido puede, en cambio, calentar el interior del sólido. Li, T'ien y Johnston examinan esa competencia en un estudio numérico de una llama de difusión próxima a una superficie sólida: la conducción adicional hacia el material modifica el límite de extinción calculado. [1]

Por tanto, el sólido restante no mide directamente lo que recibe la zona de reacción. La distinción entre inventario y suministro es una razón por la que la explicación rápida «todavía había algo que quemar» es incompleta.

2. Hay que considerar conjuntamente la reacción y la pérdida de calor

Un balance energético compacto aclara el problema. Sea U la energía térmica de una región de reacción elegida. Escribimos $dU/dt = P_{\text{release}} - P_{\text{out}}$, donde P_{release} es la tasa de liberación de energía química y P_{out} la tasa neta a la que sale energía mediante todas las demás transferencias incluidas. Ambos términos tienen unidades de potencia.

Esta expresión deliberadamente condensada exige cuidado. En un sistema con flujo, el transporte de energía por la materia que entra y sale debe incluirse en el balance, junto con la conducción y la radiación. Aquí P_{out} se define para reunir esas contribuciones netas; no afirma que la llama sea un objeto cerrado que pierde calor únicamente por su superficie.

Si P_{out} supera P_{release} , U disminuye. En condiciones adecuadas, ese enfriamiento reduce la velocidad de reacción y hace disminuir aún más P_{release} . Entonces puede dejar de existir un estado autosostenido. La afirmación importante es condicional: un desequilibrio breve no tiene por qué extinguir cualquier llama, y un balance energético por sí solo no calcula el límite completo de extinción.

3. Por qué un enfriamiento moderado puede importar mucho

La cinética química explica por qué la cantidad de reactivo no basta. La expresión de Arrhenius $k = A \exp(-E_a/RT)$ describe la dependencia con la temperatura de muchos coeficientes de velocidad de reacción en regímenes especificados. Aquí A es un factor preexponencial, E_a una energía de activación, R la constante de los gases y T la temperatura absoluta. OpenStax desarrolla esta relación al tratar la teoría de colisiones. [2]

Para una ilustración transparente, supongamos $E_a/R = 10\,000$ kelvin y tratemos A como constante. Son supuestos hipotéticos del modelo, no parámetros de un combustible concreto. Comparar 900 K con 1 000 K da $k(900)/k(1000) = \exp[-10\,000(1/900 - 1/1000)] = \exp(-1,111\dots)$, aproximadamente 0,329.

La temperatura ha caído un 10 %, pero este coeficiente del modelo ha disminuido hasta aproximadamente un tercio. El cálculo se refiere a un coeficiente, no a la velocidad total de una llama real. Las concentraciones, el transporte y las múltiples vías químicas se han dejado fuera del ejemplo. Demuestra por qué el enfriamiento puede afectar mucho a la reposición química de energía; no proporciona una temperatura de extinción.

Una reacción que libera energía en conjunto puede aun así avanzar demasiado despacio para sostener una llama. El signo del cambio energético total y la velocidad de la reacción responden a preguntas distintas. La capacidad de un combustible para liberar energía no implica que la libere con suficiente rapidez en cualquier condición.

4. Los reactivos deben encontrarse durante suficiente tiempo

Una llama también depende del transporte. El combustible y el oxidante pueden estar presentes en el entorno general sin llegar a la misma región de reacción en las proporciones necesarias. Incluso cuando se encuentran, importa el tiempo disponible para reaccionar.

Li y sus colaboradores distinguen en su sistema modelado una rama de extinción relacionada con la pérdida de calor y otra por desprendimiento de la llama, asociada a un tiempo de residencia demasiado corto frente al tiempo de reacción química. [1] Son vías distintas hacia la pérdida de la combustión sostenida. Reducir todo el problema a «se acabó el oxígeno» omitiría tanto el balance térmico como la comparación de escalas temporales.

Una comparación adimensional útil es la razón entre el tiempo de residencia del flujo y una escala temporal de reacción. Su significado depende de cómo se definan esos tiempos para el sistema. Una razón pequeña puede indicar que el material abandona una región antes de que ocurra mucha reacción, pero no es un interruptor numérico universal válido para cualquier geometría o química de una llama.

5. Qué ponen realmente a prueba los experimentos y las simulaciones

La investigación SoFIE-MIST de la NASA trata explícitamente la ignición y la extinción como funciones de varias variables, entre ellas el flujo, la concentración de oxígeno, la presión y la radiación externa, en microgravedad. Entre sus objetivos declarados figura poner a prueba modelos de inflamabilidad de materiales. [3] Ese diseño experimental constituye evidencia de que la identidad del material por sí sola no especifica la pregunta investigada; no constituye por sí mismo un informe de que se hayan confirmado todas las predicciones propuestas.

El cálculo de Li y sus colaboradores también es un resultado de modelo con geometría y aproximaciones declaradas. Investiga cómo la conducción adicional de calor modifica un

sistema concreto. [1] No debe parafrasearse como un experimento que establece un límite de extinción para todos los fuegos.

Una prueba más sólida compara el comportamiento medido con un modelo en condiciones coincidentes, incluidos los desacuerdos. Observar la extinción mientras queda combustible establece el resultado. Determinar si la causaron la pérdida de calor, el transporte, las vías químicas o su combinación requiere mediciones que distingan esas posibilidades.

6. Qué no demuestra la desaparición de la luz

La llama visible es una observación de luz emitida, no un inventario completo de la temperatura ni de las reacciones químicas en curso. Por sí sola no puede establecer que todas las partes de un material se hayan enfriado o que haya cesado toda reacción. Esa inferencia requeriría evidencia adicional sobre el material y su entorno.

Esta distinción también limita lo que una fotografía puede resolver científicamente. El brillo de una llama depende de los procesos que emiten la luz y de las condiciones de detección. Un cambio visible puede motivar una medición, pero no sustituye un balance energético o de materia.

La incertidumbre suele residir en qué mecanismo domina y dónde está su límite en un entorno concreto. No es incertidumbre sobre si basta la cantidad de combustible para garantizar que continúe la llama. Las ecuaciones y los estudios controlados explican por qué no basta.

7. La respuesta es un balance que debe mantenerse

Una llama puede apagarse aunque quede combustible porque disponer de energía química potencial no equivale a mantener una reacción por sí misma. El calor puede escapar más deprisa de lo que las reacciones lo reponen; el suministro de reactivos puede ser insuficiente; o el material puede atravesar demasiado deprisa la región pertinente para que se produzca la química necesaria.

El error habitual es tratar el combustible y el oxígeno como una explicación completa, en lugar de como dos partes de un proceso acoplado. La persistencia depende de las velocidades, el transporte y las condiciones que crea la propia reacción. La extinción marca el fallo en el sostenimiento de ese proceso, no necesariamente el agotamiento de todo lo que podría reaccionar.

Lectura relacionada

El artículo 015, «¿Por qué los rayos siguen trayectorias ramificadas?», examina cómo la ruptura eléctrica modifica el medio por el que se desarrolla. La comparación es opcional y no identifica una llama con el canal de un rayo.

Referencias

- [1] C. Li, J. T'ien and M. Johnston. Extinction of the Stagnation Point Diffusion Flame: Effect of Conductive Heat Loss into Solid Interior. Trabajo presentado en el 13th US National Meeting of the Combustion Institute, College Station, TX (2023). NASA Technical Reports Server 20230000860.
<https://ntrs.nasa.gov/citations/20230000860>
- [2] OpenStax. Chemistry 2e, apartado 12.5: Collision Theory.
<https://openstax.org/books/chemistry-2e/pages/12-5-collision-theory>
- [3] NASA. Solid Fuel Ignition and Extinction: Material Ignition and Suppression Test (SoFIE-MIST).
<https://science.nasa.gov/biological-physical/investigations/sofie-mist/>