

¿Es posible inferir la eficiencia de un proceso de combustión, a partir de una inspección visual de la llama?

Jhon Freddy Alfonso Serrano (jalfonso@cdtdegas.com)

Corporación CDT de GAS

Resumen:

El rendimiento de un proceso de combustión se expresa como una relación entre la energía real entregada a un proceso y la suministrada por un combustible de acuerdo a su poder calorífico. Así, ya que ningún proceso en la práctica es ideal, las pérdidas de energía determinarán este rendimiento, ya sean producidas por los gases de combustión, los inquemados, la radiación, etc. A pesar de la complejidad que pueda representar la evaluación de estas pérdidas, existen métodos prácticos y simples que pueden permitir inferir la eficiencia de un proceso de combustión. La inspección visual de la llama generada, y por lo tanto su color, es uno de ellos y puede ser un indicativo y un método de evaluación rápida. Tonalidades específicas presentadas por una llama pueden entonces ayudar a establecer fallas en la combustión y las acciones a tomar.

Esta Sección ha sido ideada para atender con responsabilidad social, las inquietudes de nuestros asiduos lectores; esperamos dar respuesta, en cada una de nuestros volúmenes, a aquellas personas que nos escriban a revistamyf@cdtdegas.com

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de combustión son muy comunes en la vida diaria, desde la simple cocción de alimentos, pasando por el transporte hasta grandes actividades industriales. Visualmente, inferimos la combustión como un proceso en el que se genera fuego y asociamos su color de una forma general para describir la energía que este transmite o el calor que genera. Sin embargo, existen ciertos interrogantes sobre este particular fenómeno químico, para los cuales nos gustaría obtener respuestas concisas. Algunas de ellas son: ¿A qué se debe el color de una llama? ¿Por qué la luz emitida por ésta es azul o amarilla? ¿Una llama azul es símbolo de una combustión perfecta y eficiente? Por simples que parezcan estos interrogantes, sus respuestas enmarcan complejos análisis.

En este artículo se buscará dar respuesta a una pregunta específica, que a su vez busca responder a los anteriores interrogantes. Para ello, es necesario primero que todo, tener conceptos claros acerca de la naturaleza de una llama y de lo que implica. De esta forma, a modo de aclarar conceptos, se tratarán los temas de combustión y estequiometría de una reacción, para posteriormente relacionarlos con el significado del color presentado por una llama, tratando en la medida de lo posible en no incurrir en tecnicismos incomprensibles.

Buscando responder de forma clara al interrogante, se definirán los distintos matices de una llama a través de su dependencia con tres factores fundamentales: la temperatura de la llama, la relación de exceso de aire, y el tipo de combustible.

2. COMBUSTIÓN Y ESTEQUIOMETRÍA

La combustión puede definirse de forma sencilla como la reacción química durante la cual se oxida un combustible liberando una gran cantidad de energía que genera calor o luz en forma de llama, siendo generalmente el oxígeno tomado del aire la sustancia comburente.

Sin embargo, un combustible en contacto con oxígeno no es suficiente para iniciar la combustión, ya que este debe llevarse arriba de su **temperatura de ignición** para dar comienzo a la reacción por medio de una energía de activación puntual. Además, las proporciones de aire y combustible deben estar en un nivel adecuado para dar inicio a la combustión.

Frecuentemente, en el análisis de procesos de combustión, se emplea una relación que cuantifica las cantidades de combustible y aire, conocida como la **relación aire-combustible, AC**. Esta se conoce como la relación entre la cantidad del aire y la de combustible, representando la cantidad de aire utilizada por unidad de combustible durante un proceso de combustión, ya sea en una base molar o de masa. Por ejemplo, la proporción ideal de aire y combustible en un motor de gasolina es de aproximadamente 15 kg de aire por kg de combustible, siendo esta una relación ideal teórica que se conoce como **mezcla estequiométrica**, y que garantiza la reacción total de un combustible.

En ese sentido pueden conocerse cuatro tipos de combustión: una completa estequiométrica en la que se utiliza una cantidad justa de oxígeno que oxida todo el carbono; una completa con exceso de aire en la que se emplea mayor cantidad de oxígeno que el necesario, que impide la formación de monóxido de carbono; una incompleta con defecto de aire en la que el oxígeno no es suficiente para oxidar el carbono, y una incompleta con exceso de aire donde no hay una buena mezcla de reactivos produciendo monóxido de carbono y otros componentes tóxicos [1].

Esto se puede expresar por medio de otra relación muy empleada denominada **índice de exceso de aire (λ)** que relaciona el aire real utilizado en la reacción de combustión y el aire teóricamente necesario para llevar a cabo una combustión estequiométrica, que adquiere un valor igual a la unidad ($\lambda = 1$) cuando expresa la idealidad de la reacción. Es en este punto en donde se presenta la temperatura más alta posible de una reacción de combustión, ya que por simple balance de masa un incremento en la cantidad de aire, aumenta la cantidad de gases de combustión producidos que contienen, y se llevan gran parte del calor generado por la reacción y que se traduce en ineficiencia del proceso. En este caso, el aire en exceso actúa como un refrigerante de la reacción. Cuando se presenta deficiencia de aire, la temperatura también disminuye debido a que la energía química del combustible no es liberada totalmente.

En la práctica, es muy difícil obtener una combustión estequiométrica, ya que la mezcla aire-combustible no es perfecta y la cantidad de aire no es exacta. En ese sentido, generalmente se prefiere un exceso de aire que asegure la oxidación total del carbono y una mayor calidad

en la mezcla, ya que así, las pérdidas que se obtienen debido al exceso de aire son inferiores a las que se darían por la aparición de inquemados, como el monóxido de carbono (CO) como producto de combustión, que representaría una combustión incompleta y altamente peligrosa, debido a que el CO es un conocido por ser un gas inodoro, incoloro, inflamable y muy tóxico, causando la muerte cuando se respira a niveles elevados. Es por ello que en gasodomésticos generalmente se recomiendan valores de exceso de aire superiores a $\lambda=1.5$ [1].

¿Qué nos indica el color de una llama?

El fuego es el signo visible de una reacción de combustión. Sólo los gases pueden arder con llama directamente, ya que esta solo tiene lugar en la fase gaseosa de un combustible. Para el caso de combustibles sólidos o líquidos, esta fase ocurre por encima de su superficie. La combustión de sólidos se produce mediante llamas o brasas, esta última siendo un fenómeno de combustión superficial que libera menos calor y no produce una llama visible.

En combustibles líquidos, para que se produzca la combustión es necesario que el líquido se gaseifique, así, la probabilidad de ignición es mayor en líquidos cuya ebullición ocurra a menor temperatura. [2]

Como se mencionó anteriormente, existen diversos factores que influyen la coloración característica de una llama generada por el proceso de combustión de un hidrocarburo. Estos son principalmente: la temperatura de la llama y el exceso de aire; factores dependientes entre

El color de una llama, en primer lugar, depende de su temperatura, ya que esta es proporcional a la cantidad de calor desprendido y por lo tanto a la cantidad de radiación emitida.

El color de la llama es relativo o indicativo de su temperatura, dependiendo del tipo de combustible y de las condiciones específicas de cada reacción.

sí, que se explica con el concepto de la relación aire-combustible y por último, el tipo de combustible, debido a su cinética química.

El color de una llama, en primer lugar, depende de su **temperatura**, ya que esta es proporcional a la cantidad de calor desprendido y por lo tanto a la cantidad de **radiación** emitida.

La radiación térmica envuelve transferencia de calor por ondas electromagnéticas confinadas a la "sección" visible del **espectro electromagnético**. A medida que un cuerpo es calentado su temperatura aumenta, perdiendo calor por convección y radiación, hacia el ambiente.

La convección es predominante a bajas temperaturas (menor a 200°C) pero arriba de los 400°C, predomina la radiación térmica. A una temperatura de 550°C, un cuerpo emite suficiente radiación dentro de la región visible del espectro, adquiriendo un brillo rojo opaco. Con el incremento de la temperatura, el color cambia, presentándose tonalidades entre rojo opaco (700°C), rojo escarlata (900°C), naranja (1100°C) y blanco (1400°C). [3]

Así, de forma similar a la radiación emitida por un cuerpo, a mayor temperatura de llama, se emite luz de mayor frecuencia y por tanto luz de menor longitud de onda y mayor radiación. En este caso, teniendo en cuenta que el color que se percibe por el ojo humano como azul, tiene una menor longitud de onda que el percibido como rojo, haciendo referencia al **espectro de luz visible** (Figura 1), se deduce que, por ejemplo, el gas natural desprende mayor cantidad de calor en la reacción de combustión que el gasóleo, a pesar de que su **poder calorífico** sea similar, lo que se evidencia en el color de llama ideal para cada caso. Así, la frecuencia de luz emitida por una llama y por tanto el

color percibido, es proporcional al calor que esta desprende, existiendo una correlación entre calor y temperatura.

Sin embargo, una temperatura específica de la llama no necesariamente determina su color ya que la **radiación de cuerpo negro**² no es el único factor de incidencia en este aspecto. De hecho, podría decirse que el color es casi independiente de la temperatura de la llama. Por ejemplo, en casos en los que se sustituye el aire por oxígeno puro (Oxicombustión³, recordando que el aire es una mezcla compuesta principalmente de oxígeno y nitrógeno, como en el caso de sopletes), la llama aumenta su temperatura y obtiene una mayor intensidad, pero sigue teniendo una tonalidad azul. En este sentido, podemos deducir que el color de la llama es relativo o indicativo de su temperatura, dependiendo del tipo de combustible y de las condiciones específicas de cada reacción.

Otro factor muy importante en una llama de hidrocarburo es el **suministro de oxígeno**, haciendo referencia a las condiciones de estequiometría de una reacción específica, además del grado de pre-mezcla de los reactantes. Por lo tanto, es necesario definir dos tipos de llama: en una **llama de difusión**, tanto el oxígeno como el combustible se 'difunden' entre sí produciéndose la llama inmediatamente se produce la mezcla, como en el caso de una vela común, tomando un ejemplo. Una ventaja de este tipo es la longitud de llama alcanzada que es a veces requerida, sin embargo, se obtiene una menor temperatura y se produce hollín. El otro tipo es el de **llama de premezcla** en el que el oxígeno es mezclado con el combustible previamente.

Este último tipo, permite garantizar un exceso de aire ideal y es empleado en la combustión de gases de alto poder calorífico, debido a la alta necesidad de oxígeno y a que puede consumirse gran cantidad de gas de forma óptima. Además, este tipo de llama permite alcanzar temperaturas más altas, concentrando la fuente de calor sin generar hollín, aunque debe garantizarse una entrada de aire primario precisa para que no se produzcan fenómenos de **desprendimiento** o **retroceso de la llama**, fenómenos presentados

² Concepto que se relaciona con la radiación emitida por un cuerpo ideal, cuyo espectro depende exclusivamente de su temperatura.

³ Caso particular de combustión en el que se emplea oxígeno puro, que aunque aumenta la temperatura de la llama, evita la formación de los conocidos NO_x , formados a altas temperaturas y altamente contaminantes.

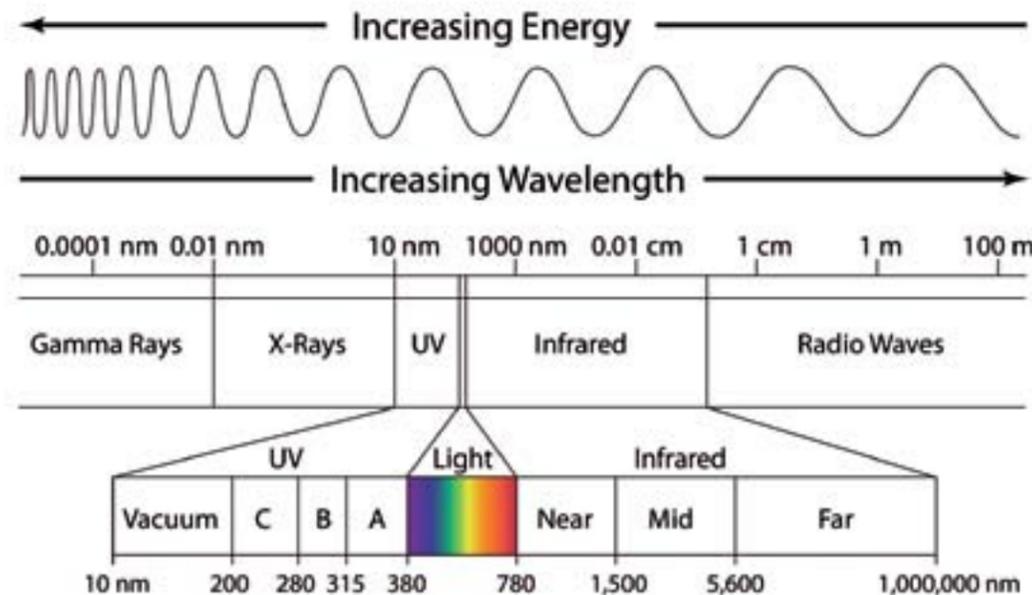


Figura 1. Espectro de luz visible¹

¹ Electromagnetic Spectrum. Fuente: Window Image - Window Films for Residential and Commercial applications. Copyright 2011. URL: <http://www.windowimage.sg/about/#spectrum>.

cuando existe un desequilibrio entre la velocidad de avance de la llama y la de salida de la mezcla de un quemador [1].

Un mechero Bunsen⁴ es un ejemplo claro del factor de aireación en la combustión y que es muy empleado en pruebas de laboratorio. Es fácilmente apreciable el cambio en el color de la llama dependiendo del suministro de oxígeno del aire. De acuerdo a la Figura 2, bajo condiciones estándar, en el primer escenario de cierre total del suministro de aire de premezcla, el mechero arde con llama amarilla. Esto se debe a la incandescencia de partículas de hollín que se producen en la llama, debido a la incorrecta combustión de los hidrocarburos que componen el gas combustible, producido por un exceso de gas o deficiencia de aire.



Figura 2. Tipos de llama en un mechero Bunsen dependiendo del flujo de aire. 1. Válvula de aire cerrada. 2. Válvula medio cerrada. 3. Válvula semi-abierta. 4. Válvula abierta al máximo⁵.

Ahora, una llama presenta diferentes tonalidades de acuerdo a la cantidad de aire presente y su temperatura. Por ejemplo, en el caso de una llama de difusión, la parte más ‘fría’ tenderá a presentar un color rojizo debido a una combustión incompleta, con transiciones en el espectro de luz visible a medida que aumenta su temperatura. El color blanco de una región de llama representa la sección más caliente.

A su vez, cabe destacar que dependiendo de la calidad de la mezcla aire-combustible se presentará una mayor **velocidad de propagación** de la llama, descrita como la velocidad a la cual se produce la combustión y que depende de la proporción entre combustible y comburente en la premezcla y de la temperatura de esta, siendo un aspecto de gran importancia en la **estabilidad** de la llama [1]. Esto puede apreciarse con facilidad en la Figura 2.

En tercer lugar, por otro lado, cada combustible genera un color de llama característico, así, al quemar gas natural o algún gas licuado la llama obtendrá una tonalidad azul en situaciones cercanas a la estequiometría, tal como se aprecia en un mechero de Bunsen. Ahora, experimentalmente, al quemar gasóleo (Gasoil) o combustóleo (Fueloil), la llama resultante será de color amarillo en una mezcla ideal.

El color característico amarillo luminoso es el efecto claro de la emisión de diminutas partículas de carbón u hollín, con diámetros del orden de entre 10-100 nm que se forman dentro

de la llama, principalmente del lado del combustible de la zona de reacción. Estas pueden ser consumidas a medida que pasan la región oxidativa, de lo contrario escapan de la llama para formar humo o cenizas. Las partículas de hollín que quedan dentro de la llama, alcanzan altas temperaturas y se comportarán como un diminuto cuerpo negro. El espectro resultante emitido desde la llama será continuo, y la potencia emisiva neta será una función de la concentración de partículas y el espesor de la llama. [3]

A medida que se incrementa la entrada de aire se produce menos hollín con radiación de cuerpo negro en la llama ya que la combustión es más completa, por lo que se crea una energía suficiente para excitar las moléculas del gas, que da lugar al color azul característico. En el caso de combustión completa con premezcla, el color se produce por la emisión de radicales excitados en la llama, que emiten una luz con longitud de onda inferior a los 560 nm (Figura 1) correspondientes a tonos azules y verdes del espectro visible. Para el caso analizado, ya que el gas natural es considerado más ‘limpio’ que el Gasoil, a su vez su combustión es más limpia y sin tantas partículas de hollín y con mayor temperatura. De esta forma se explican los colores característicos en la llama de cada tipo de combustible y por lo tanto dependerá de la sustancia que se quema.

Otro aspecto influyente es la cinética química.

Las reacciones de combustión que conocemos a partir del estudio teórico en realidad son simplificaciones de la totalidad de las reacciones que realmente ocurren. Por ejemplo, en la combustión de metano, típicamente se simplifica la reacción a metano y oxígeno como reactivos y a dióxido de carbono y agua como productos mediante un balance de masa básico. Sin embargo, el proceso global es mucho más complejo, involucrando gran cantidad de reacciones intermedias en cadena, por lo que el mecanismo por el cual tomo lugar la reacción global “implica una serie de pasos elementales en las que fragmentos moleculares altamente reactivos (radicales como ‘OH o CH₃’) toman parte. Estos radicales tienen una existencia transitoria dentro de la llama y son responsables del rápido consumo del combustible [3]” liberando a su vez cierta cantidad de energía con una longitud de onda particular a cada tipo de radical, que resulta en la emisión de luz visible característica de cada combustible.

Como un resumen final, la Tabla 1 indica la forma y color de llama obtenida para dos tipos de combustible empleados comúnmente (Gas natural y Fueloil) dependiendo del exceso de aire. Es importante tener en cuenta además, que dependiendo del tipo de combustible, se presentan colores de llama distintos.

¿Combustión sin llama?

Nuevas tecnologías se imponen en la actualidad cuando hablamos de combustión, todas ellas buscando incrementar la eficiencia de un proceso.

El color de la llama depende principalmente de 3 aspectos fundamentales: la temperatura de la llama, la relación aire-combustible y el tipo de combustible.

Entre ellas podemos encontrar la **Oxicombustión** que se menciona anteriormente, la **Combustión en medio poroso** (donde se pueden obtener temperaturas superiores a la de flama adiabática), la **Microcombustión** (para aplicaciones de micropotencia y con densidad de energía muy superior a las entregada por una batería de litio) o la tecnología de **Combustión sin llama**. [5]

Sin entrar en detalles, la **Combustión sin llama** es una reacción en la que no existe un frente de llama, se producen emisiones contaminantes muy bajas y se presenta una cinética química diferente.

Suministro de aire	Tipo de Combustible	
	Gas natural	Fueloil
Deficiencia de aire	Llama con tendencia amarilla	Llama con tendencia oscura
Aire correcto	Llama celeste con leves puntas rosadas	Llama rojiza o amarillenta brillante
Exceso de aire	Llama muy azul y semitransparente	Llama muy clara y brillante

Tabla 1. Forma y color de llama en relación al exceso de aire en la combustión de Gas natural y Fueloil⁶.

⁴ El mechero Bunsen es un instrumento empleado en laboratorios para calentar muestras químicas. Es un quemador de premezcla de aire y gas, inventado por Robert Bunsen.

⁵ Bunsen Burner Flame Types. Author: Arthur Jan Fijalkowski (WarX) using Open Source software and released under GFDL. Copyright 2005. URL: <http://artundergroundstl.org/?cat=8#>

⁶ Ver Referencia [4]. Esquema original tipo jerarquía. Modificado por Autor.

Básicamente se obtiene cuando la temperatura de los reactivos alcanza un valor mayor al de autoignición del combustible empleado y a concentraciones de oxígeno en la zona de reacción por debajo del 15%, caso contrario al de una combustión ordinaria. Esta tecnología tiene algunas ventajas como la distribución de temperatura y de transferencia de calor uniforme con muy bajas emisiones de CO y NO_x. Así, aunque el signo visible de una reacción de combustión sea la llama, puede comprobarse de esta forma que la combustión de un hidrocarburo no necesariamente implica su formación.

3. CONCLUSIONES

El color de la llama depende principalmente de 3 aspectos fundamentales: la temperatura de la llama, la relación aire-combustible y el tipo de combustible. El primero debido a la radiación emitida que genera longitudes de onda dentro del espectro de luz visible interpretadas por el ojo humano como colores específicos. El segundo debido a la formación de hollín en la llama cuando hay deficiencia de aire o directamente relacionado con la energía perdida en los gases de combustión que a su vez implican una relación con la temperatura. El tercero debido a la composición de cada gas combustible y su cinética química.

Tomando como ejemplo clave el gas natural, se explica el color celeste de la llama como la condición ideal de combustión. Tonalidades rojizas, naranjas o amarillas son un indicativo de una combustión incompleta, por lo que debe ajustarse la entrada de aire empleando generalmente quemadores de premezcla. Sin embargo, debe emplearse un exceso de aire superior al 20-30% para evitar la formación de monóxido de carbono (CO) generados por inquemados, siendo altamente tóxico y de óxidos de nitrógeno (NO_x) generados por altas temperaturas de llama y que contribuyen al calentamiento global y a la formación de lluvia ácida. Excesos de aire muy grandes adquieren una tonalidad muy azulada y semitransparente que representan ineficiencia del proceso de combustión debido al aumento de las pérdidas por gases de combustión.

A excepción de tecnologías como la combustión sin llama, en la práctica y respondiendo directamente al interrogante planteado, en la mayoría de los casos es posible inferir la calidad de la combustión en cualquier proceso a partir del color de la llama, independientemente de la potencia generada.

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que “las variaciones de color también pueden producirse por otras razones, engañosas a la vista, como cuando hay un mezclado incorrecto de los reactivos. Por lo tanto la visualización sirve como indicativo y de evaluación rápida, pero nunca debe tomarse como parámetro de buen funcionamiento sin realizar un análisis de gases periódicos [4]”, por lo que debe emplearse un analizador de gases de combustión para detectar directamente ineficiencias y problemas mayores.

4. BIBLIOGRAFÍA

[1] Asociación Española del Gas - SEDIGAS. Especificaciones técnicas de Sedigas para personal de pruebas previas, puesta en servicio e inspección periódica. Tema 6: Combustión de los aparatos de gas. Revisión 00. 2011.

[2] Centro de Investigación y Seguridad Vial MAPFRE - CESVIMAP. Investigación de Incendios en Vehículos. Capítulo 1: El fuego y el calor. p. 8,14.

[3] Dougal Drysdale. An introduction to fire dynamics. Second Edition. John Wiley & Sons. p. 23, 24, 52, 53, 69. Traducido por el Autor.

[4] FIMACO S.A. Equipamientos para la industria. Seminario Aparatos Sometidos a presión. Capítulo 4: Combustión. p. 9.

[5] Andrés Amell Arrieta. Tendencias Tecnológicas en Combustión. IV Jornada de Ingeniería en Energía UNAB: Tendencias Tecnológicas en Combustibles. Universidad de Antioquia. Facultad de Ingeniería. 2012.



www.cdtdegas.com