

## ANÁLISIS TEÓRICO DE LA COMBUSTIÓN EN QUEMADORES DE GAS NATURAL

### RESUMEN

Se presenta el análisis teórico del proceso de combustión que ocurre en quemadores de gas natural. El comportamiento del calor disponible, la eficiencia de combustión y las emisiones contaminantes, es evaluado en función del exceso de aire y la temperatura de los gases de combustión. Se calcula el valor de la temperatura máxima de productos y su relación con el exceso y el precalentamiento del aire. Se establecen consideraciones energéticas y ambientales para el perfeccionamiento de la operación de quemadores industriales.

**PALABRAS CLAVES:** Combustión, quemadores, gas natural, emisiones.

### ABSTRACT

*Theoretical analysis of combustion process occurring in natural gas burners is presented. The performance of available heat, combustion efficiency and pollutants is evaluated as function of excess air and flue gas temperature. The value of maximum temperature of products and its relation with excess and preheating air is calculated. Energy and environmental considerations are established in order to improve the operation of industrial burners.*

**KEYWORDS:** Combustion, burners, natural gas, pollutants.

### 1. INTRODUCCIÓN

El panorama energético nacional e internacional en los años recientes está afrontando un gran desafío debido a las restricciones ambientales en la utilización de los combustibles fósiles y a las constantes alzas en los precios de los derivados del petróleo. Consecuentemente, el uso del gas natural como combustible limpio y con precios competitivos ha venido aumentando en los sectores industrial, comercial, doméstico y vehicular.

Ante tal panorama, el pleno conocimiento sobre el fenómeno de combustión del gas natural, y en particular, en quemadores de gas, constituye una herramienta fundamental para el perfeccionamiento de la explotación y el diseño de los mismos, bajo criterios ambientales, técnicos, legales y económicos.

Como parte del proyecto de investigación<sup>1</sup> *Análisis de la influencia de las condiciones de la mezcla aire-combustible en la composición y la temperatura de los productos de combustión en quemadores de gas*, en este artículo se analiza teóricamente los parámetros influyentes en la combustión del gas natural, constituyendo esto un avance de la primera fase contemplada en el proyecto.

### JUAN CARLOS SERRANO

Ingeniero Mecánico, M. Sc.  
Profesor Auxiliar  
Programa de Ingeniería Mecánica  
Universidad de Pamplona  
jcserrano@unipamplona.edu.co

### YAMID ALBERTO CARRANZA SÁNCHEZ

Ingeniero Mecánico, M. Sc.  
Profesor Auxiliar  
Escuela de Tecnología Mecánica  
Universidad Tecnológica de Pereira  
yamidc@utp.edu.co

Se estudian algunos parámetros influyentes en el proceso de combustión como la relación entre la temperatura máxima de llama, el calor disponible en los gases de combustión, la eficiencia de combustión y las emisiones contaminantes como función del exceso de aire (relación aire-combustible), la temperatura de los reactantes y la temperatura de los gases de combustión. Todo esto como herramienta en la toma de decisiones tanto económicas como ambientales.

En todos los cálculos termoquímicos se ha tenido en cuenta la disociación de especies y se ha empleado el programa computacional STANJAN [9].

### 2. TEMPERATURA MÁXIMA DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN [6]

El modelo utilizado para el análisis de combustión se basa en metano, principal componente del gas natural, y como oxidante el aire, constituido por oxígeno y nitrógeno. Se desprecia el argón y trazas de otros constituyentes. Las condiciones de los reactantes, excepto en el precalentamiento del aire, son 298,15 K y 1 atm.

La máxima temperatura que pueden alcanzar los productos de combustión es la temperatura adiabática de llama. Es la temperatura que se obtiene si todo el calor desarrollado durante el proceso se utiliza integralmente para calentar los productos. El procedimiento de cálculo de la temperatura de llama adiabática, considerando los fenómenos de disociación, se lleva a cabo por iteración

<sup>1</sup> Proyecto financiado y patrocinado por Colciencias e inscrito por el Grupo de Investigación de Energías Renovables GIDER de la Universidad de Pamplona.

de la temperatura de los productos hasta que se cumpla la siguiente expresión:

$$H_{\text{reactantes}} = H_{\text{productos}} \quad (1)$$

En la ecuación (1) la  $H_{\text{reactantes}}$  se refiere a la entalpía del combustible y del aire que hacen parte del proceso de combustión. Cuando toda esta energía es empleada para elevar la temperatura de los humos de combustión, sin pérdidas de calor hacia el medio, los productos alcanzarán una entalpía  $H_{\text{productos}}$  igual a la de los reactantes, y por ende, obtendrán su máxima temperatura.

La figura 1 presenta la variación de la temperatura máxima de los productos de combustión en función del exceso de aire de la combustión. Se observa que la máxima temperatura ocurre para una condición de mezcla rica o defecto de aire del 3%. Aunque comúnmente se asocia la temperatura adiabática de llama a la condición estequiométrica o de cero exceso de aire, para la condición real de disociación de especies mayores ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ) y formación de especies menores ( $\text{CO}$ ,  $\text{HO}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ , entre otras) la máxima temperatura adiabática ocurre en una mezcla ligeramente rica porque el calor específico de los productos se reduce permitiendo el incremento de la temperatura [7].

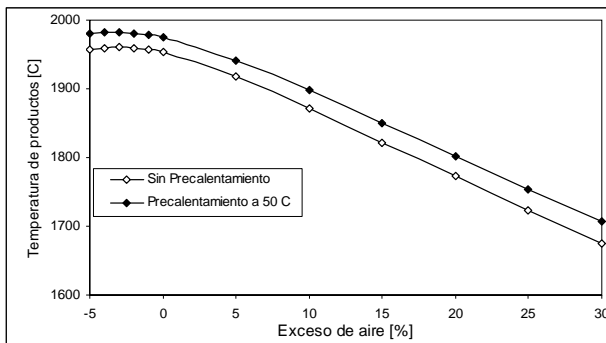


Figura 1. Influencia del exceso de aire y su precalentamiento en la temperatura de los productos de combustión.

Nótese la influencia del precalentamiento del aire de combustión. Cuando este aire ingresa no a 25 °C sino a 50 °C, las temperaturas de llama se incrementan, lo que redundará en mayor calor adicionado a la carga y a la reducción en los consumos energéticos del proceso. No menos importante es el control del exceso de aire debido a que un incremento desmesurado de este ocasiona una caída drástica en las temperaturas de llama.

### 3. CALOR DISPONIBLE Y EFICIENCIA DEL PROCESO [1] [5] [8]

Los productos de combustión poseen una energía térmica de acuerdo a su temperatura. Esta energía o calor disponible  $Q_{\text{disp}}$ , entendido como la cantidad de energía que puede ser convertida en energía útil, es tanto mayor,

entre más fríos salen los gases de combustión del proceso de calentamiento de una carga, lo que indica un aprovechamiento notable de la energía térmica. El calor disponible está definido como:

$$Q_{\text{disp}} = PCS - Q_{\text{gases}} \quad (2)$$

donde:

$PCS$ : es el poder calorífico superior del combustible.

$Q_{\text{gases}}$ : es la energía contenida en los gases de combustión, igual a la entalpía de productos a la temperatura de interés  $H_{\text{prod}@T}$  menos la entalpía de los productos a 298,15 K,  $H_{\text{prod}@298,15}$ .

El gas natural caracterizado como metano  $\text{CH}_4$  y tiene un poder calorífico superior de 55528 kJ/kg. La figura 2 muestra cual es la relación entre el exceso de aire en el quemador y la temperatura de los gases de combustión sobre el calor disponible del proceso de calentamiento, este último como porcentaje del poder calorífico superior que sería la máxima energía útil. Se puede notar que para un exceso de aire fijo el calor disminuye a medida que la temperatura de los gases aumenta, lo que indica que no se le está extrayendo toda la energía útil a los humos y está quedando un remanente importante y susceptible de aprovechamiento. Si se considera constante la temperatura de los humos, se nota la clara influencia negativa del exceso de aire, puesto que el calor disponible disminuye debido a que el aire que adicionalmente ingresa a la combustión consume parte de la energía química transformada.

Una consideración importante para disminuir la temperatura de los productos, y de esta manera, incrementar calor disponible es la instalación de recuperadores de calor. Generalmente los recuperadores de calor constituyen alternativas con buena viabilidad técnico-económica. La limitación para reducir la temperatura de los humos es la formación de ácido sulfúrico, pero con el gas natural este inconveniente no tiene importancia.

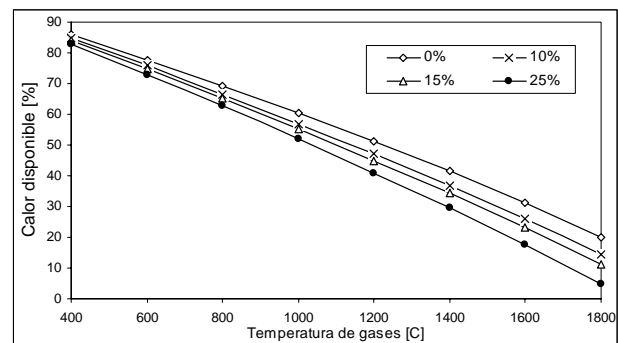


Figura 2. Porcentaje de calor disponible respecto al poder calorífico superior como función de la temperatura de los gases de combustión y el exceso de aire.

La eficiencia de un quemador está asociada a la energía química que es posible ser transformada en calentamiento de los productos de combustión, y es el 100% si toda la energía química almacenada en el combustible es convertida en calor disponible para el proceso. Si se conoce la temperatura de los reactantes y su entalpía  $H_{react}$  y la temperatura de los productos de combustión inmediatamente a la salida del quemador y su energía contenida  $H_{prod}$ , se puede definir la eficiencia como:

$$\eta_{comb} = \frac{PCS - (H_{prod} - H_{react})}{PCS} * 100\% \quad (3)$$

La figura 3 muestra el comportamiento de la eficiencia de combustión de acuerdo a la temperatura que poseen los gases inmediatamente a la salida del quemador.

Obsérvese cómo para un exceso de aire definido, la eficiencia incrementa a medida que la temperatura de los gases se eleva. Lo anterior quiere decir que una alta temperatura de los productos de combustión, directamente en la salida del quemador, constituye un indicativo del menor impacto de las pérdidas caloríficas debido a la formación de agua en forma de vapor  $H_2O_{(v)}$ , a la disociación de especies a través de reacciones que son endotérmicas y a las pérdidas de calor en la llama radiante.

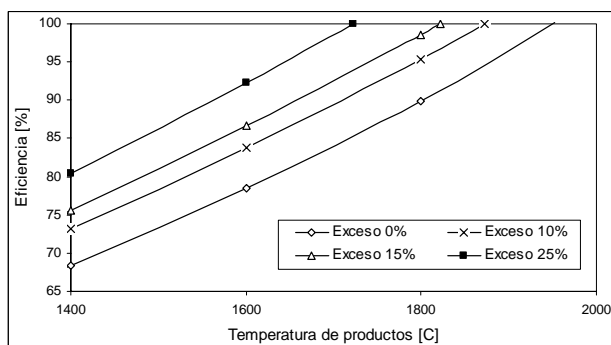


Figura 3. Eficiencia de combustión vs temperatura de productos y exceso de aire.

Cuando se comparan a una misma temperatura de productos, las combustiones para diferentes excesos de aire, la interpretación es de la siguiente manera. Una combustión sin exceso cuyos productos estén a la misma temperatura de una combustión con exceso y bajo la misma adición calórica por unidad de combustible  $PCS$ , indica que el quemador es más eficiente. Y esto es claro porque el exceso de aire es una carga térmica que igualmente necesita ser calentada hasta el nivel de temperatura analizado, por ende, ocurre una mejor utilización de la energía del portador energético.

Se espera entonces, que para quemadores de similar eficiencia y operando con el mismo combustible, la temperatura de los productos sea mayor en el quemador que emplee el menor exceso de aire, ver figura 3.

Obsérvese también cómo las combustiones con exceso no desarrollan niveles de temperatura tan altos como las combustiones estequiométricas.

Los quemadores industriales suelen operarse con un exceso de aire del 15% con el fin de minimizar riesgos ante posibles gases inquemados. Utilizar mayores excesos sería desfavorable energéticamente y emplear excesos muy bajos conllevaría a tener mezclas poco íntimas de aire y combustible con la consecuente generación de inquemados y de riesgos asociados a los inquemados combustibles.

#### 4. CONCENTRACIONES DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN [10]

En la práctica de las pruebas para el análisis de productos de combustión, suelen ser relevantes las mediciones de  $CO_2$  u  $O_2$ ,  $CO$  y  $NO_x$ . Tanto el dióxido de carbono  $CO_2$ , como el  $O_2$ , están relacionados con la eficiencia de combustión junto con la temperatura de los gases.

La presencia de monóxido de carbono  $CO$  es un indicativo de disminución de eficiencia (la reacción para la generación de monóxido es endotérmica), pero se prefiere su significado en relación con la toxicidad y el riesgo de inflamabilidad. El monóxido de carbono es muy peligroso por cuanto es imposible de detectar sin un instrumento de prueba, y las consecuencias de su concentración y periodo de exposición pueden ir desde ligeros dolores de cabeza hasta la muerte.

Los óxidos de nitrógeno  $NO_x$  son responsables de la formación de ácidos en la atmósfera contribuyendo a la creación de lluvia ácida, y han constituido, uno de los aspectos que últimamente más ha aportado al desarrollo tecnológico de los equipos de combustión.

A continuación se presentan los valores de concentración de los mencionados productos de combustión en dependencia de la temperatura de los gases y de diferentes excesos de aire. Los datos contenidos en estas figuras constituyen una referencia para labores de análisis de productos de combustión.

El proceso de obtención de estas concentraciones se realizó con el programa STANJAN considerando la disociación de especies.

Vale la pena resaltar que los resultados arrojados por el programa están en base húmeda, es decir, considerando el agua en forma de vapor que hace parte de los gases. Por lo tanto, se hace la corrección a base seca, muy comúnmente utilizada por los equipos de análisis de gases, mediante la expresión:

$$\chi_{i,seca} = \chi_{i,húmeda} \frac{N_{mezcla-húmeda}}{N_{mezcla-seca}}$$

Donde:

$\chi_{i,seca}$  es la fracción molar o concentración en base seca

$\chi_{i,húmeda}$  es la fracción molar en base húmeda

$N_{mezcla-húmeda}$  es el número de moles total en la mezcla húmeda

$N_{mezcla-seca}$  es el número de moles total en la mezcla seca

La figura 4 presenta la concentración de especies para un exceso de aire nulo o 0%. Es relevante mencionar que los niveles de CO<sub>2</sub> se mantienen alrededor del 12% disminuyendo levemente a partir de los 1200°C y empezando la generación de CO, como consecuencia de los efectos del fenómeno de disociación. Esta concentración con gases de combustión a elevadas temperaturas constituiría un serio problema ambiental debido a que los niveles de CO deberían ser mantenidos en un máximo de 400 ppm de acuerdo a las regulaciones establecidas por Environmental Protection Agency (EPA) y American Gas Association (AGA) [2].

Los niveles de NO<sub>x</sub> también se incrementan con la disociación generada por la elevación de la temperatura de los gases. Los niveles de NO<sub>x</sub> deben mantenerse en 40 ppm para calderas en el rango de 5-40 MM Btu/h [2].

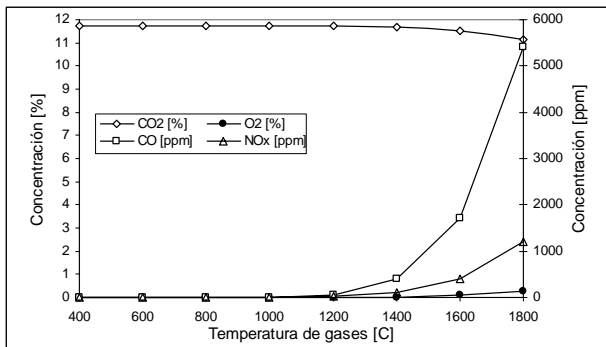


Figura 4. Concentración en base seca vs temperatura de productos para un exceso del 0%.

En la figura 5 se comienzan a observar los efectos del exceso de aire. Se destaca la reducción de los niveles de CO mejorando las condiciones ambientales en lo que a este contaminante se refiere, pero se nota un incremento notable de los óxidos de nitrógeno respecto al exceso de aire nulo en la figura 4. Debido al exceso se nota ya una concentración de oxígeno alrededor del 2% la cual se disminuye levemente a medida que se aumenta la temperatura y se forman los NO<sub>x</sub>.

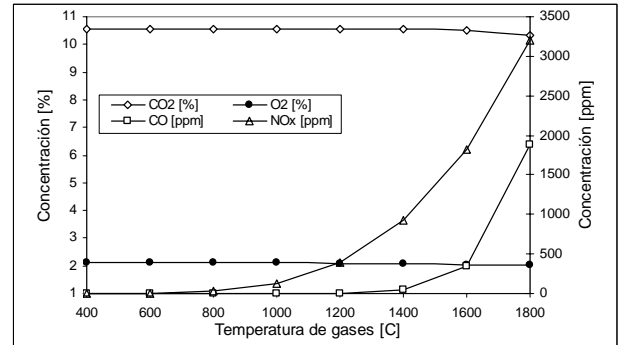


Figura 5. Concentración en base seca vs temperatura de productos para un exceso del 10%.

La figura 6 constituye la gráfica de referencia para el análisis de la combustión en quemadores de gas. Lo anterior debido a que los fabricantes recomiendan operar con excesos de aire del 15%. Cuando un equipo es explotado bajo esta recomendación, se deberían obtener concentraciones en base seca de CO<sub>2</sub> alrededor del 10%, concentraciones de O<sub>2</sub> alrededor del 3%, y concentraciones de CO y NO<sub>x</sub> variables con la temperatura de los productos de combustión. Se resalta nuevamente el efecto negativo de emitir gases de combustión a temperaturas elevadas debido a las altas concentraciones de los anteriores contaminantes.

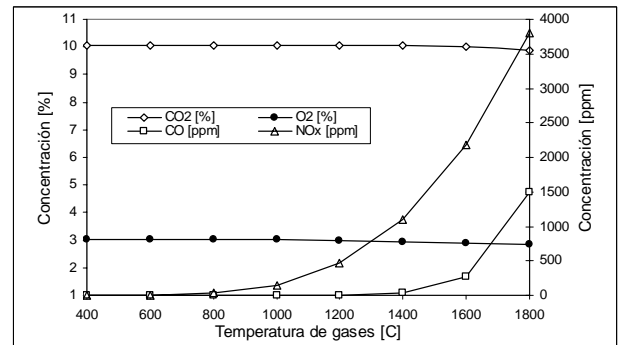


Figura 6. Concentración en base seca vs temperatura de productos para un exceso del 15%.

Excesos de aire elevados como lo muestra la figura 7, constituyen un decremento considerable en la eficiencia térmica del proceso como consecuencia de la energía absorbida por el aire en exceso. Y tal como lo señala la tendencia de concentraciones versus excesos de aire, los incrementos de NO<sub>x</sub> se hacen más notables.

Las anteriores figuras son herramientas útiles a la hora de llevar a cabo un diagnóstico de gases, debido a que es posible acceder a ellas con la temperatura de los gases y el porcentaje de O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> o CO para determinar el exceso de aire con el cual opera el quemador y de esta manera calcular la eficiencia del proceso, o para conocer la concentración de los otros contaminantes.

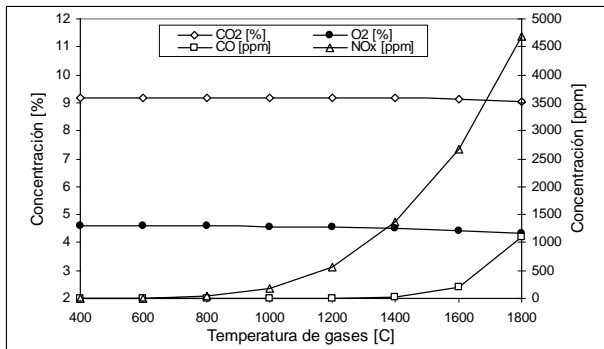


Figura 7. Concentración en base seca vs temperatura de productos para un exceso del 25%.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se desarrollan herramientas teóricas de combustión para conocer la relación y la influencia entre las diferentes variables de operación de quemadores e gas natural.

El conocimiento de las tendencias y el comportamiento del fenómeno de combustión ha permitido establecer consideraciones energéticas y ambientales acerca del proceso de combustión.

Se ha determinado la influencia negativa del exceso de aire en la máxima temperatura de los productos, el efecto positivo que tiene el precalentamiento de aire en dicha temperatura.

Una mayor temperatura de los productos inmediatamente a la salida del quemador, será un indicativo de una mayor eficiencia de este equipo.

El exceso de aire y la temperatura de los productos en un proceso térmico basado en la combustión del gas natural, son los factores más determinantes en los aspectos ambientales y energéticos del proceso.

Las predicciones teóricas de la combustión del metano, principal constituyente del gas natural, permitirán la posterior comprobación en la experimentación con el objetivo de desarrollar estrategias en los quemadores industriales que maximicen el uso de energía y minimicen la generación de contaminantes.

En esta primera parte del proyecto se busca desarrollar modelos teóricos en el fenómeno de combustión para después integrarlos en el conjunto cámara de combustión -quemador de gas, y poder lograr el objetivo del proyecto de mejorar los sistemas de combustión existentes en la industria colombiana.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

[1] AMELL A., A., GIL B., E., y MAYA B., R. Herramientas para el uso eficiente del gas: diagramas de eficiencia térmica. Revista Facultad de Ingeniería, pág 55-68, Universidad de Antioquia.

[2] BACHARACH. Catálogo: Combustion efficiency, 13 páginas, [www.bacharach-inc.com](http://www.bacharach-inc.com).

[3] CASTRO MORA, Javier. Operación y mantenimiento de calderas, 244 páginas, Bogotá-Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2002.

[4] CLEAVER BROOKS. Catálogo: Boiler efficiency, 20 páginas, [www.cleaver-brooks.com](http://www.cleaver-brooks.com).

[5] ECLIPSE INC. Catálogo: Engineering guide, 118 páginas, [www.eclipsenet.com](http://www.eclipsenet.com).

[6] GLASSMAN., Irving. Combustión, 631 páginas, USA: Academia Press, 1996.

[7] KUO, Kenneth K. Principles of combustión, 810 páginas, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1986.

[8] MARQUEZ M., Manuel. Combustión y quemadores, 159 páginas, Barcelona: Marcombo, S. A., 1989.

[9] REYNOLDS, W. C. The element-potencial method for chemical equilibrium análisis: implementation in the interative program STANJAN. Department of Mechanical Engineering. Stanford University. Stanford, CA.

[10] TURNS, Stephen. An introduction to combustión, 565 páginas, New York: McGraw-Hill, Inc., 1996.