



Combustión en altura

Ing. Carlos Jesús Velasco Hurtado

Ing. Javier Alejandro Velasco Villarroel

Resumen

La altitud sobre el nivel del mar a la que se encuentran situadas algunas poblaciones de nuestro país, tiene una marcada influencia sobre los procesos de combustión que se desarrollan en ellas.

En el trabajo se estudia el efecto de la altitud sobre las propiedades del aire, y como éstas influyen sobre la temperatura de llama, el factor de utilización de combustible, la velocidad de combustión y sus consecuencias sobre la velocidad de deflagración y la potencia térmica de la combustión.

Introducción

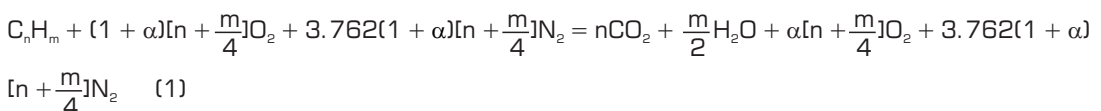
La combustión es una reacción química de oxidación de las sustancias combustibles, que se desarrolla con bastante velocidad, desprendimiento de energía, luz y productos gaseosos de reacción. La energía generada por la combustión, puede ser utilizada para la generación de calor ó la generación de movimiento.

La importancia de estudiar el efecto de la altitud sobre los parámetros característicos de la combustión, es que permite definir criterios que sean apropiados para el diseño de quemadores, intercambiabilidad de combustibles, seguridad de la combustión, eficiencia en el uso de combustibles, etc., para regiones situadas en altura.

1. El proceso de combustión

Todos los combustibles para generar la combustión, requieren un comburente que en la mayoría de los casos es el aire atmosférico. El aire seco a presión normal está compuesto por 20.946% de oxígeno, 78.084% de nitrógeno, y otros gases inertes que se suman al contenido de nitrógeno. Para efectos prácticos, se considera que los componentes del aire son sólo nitrógeno y oxígeno, y que su composición en base volumétrica es 21% O₂ y 79% N₂.

En los cálculos de tipo técnico, se considera esta composición como constante, y para introducir el contenido de nitrógeno en las reacciones de combustión, se considera que por mol de oxígeno presente en el aire, se tienen asociados $79/21 = 3.762$ moles de nitrógeno. De esta manera, la reacción de combustión completa para un combustible de fórmula general C_nH_m con aire seco, se puede escribir como:



En esta reacción, n es el número de átomos de carbón en el hidrocarburo, m el número de átomos de hidrógeno y α el exceso de aire, escrito como fracción.

2. Efectos de la altura

La altitud sobre el nivel del mar tiene un efecto importante sobre las condiciones en las que se encuentra el aire y su composición. La presión del aire disminuye a medida que crece la altura del punto de medida, y por lo tanto, también disminuye la concentración de oxígeno.

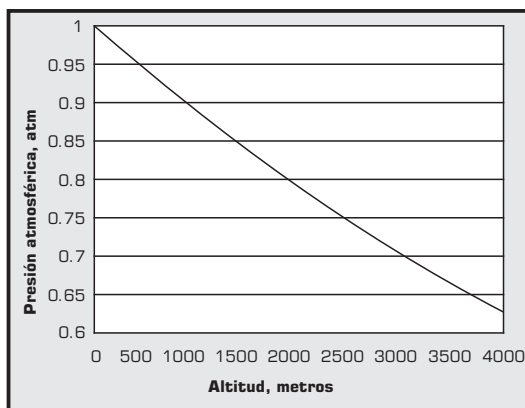


Figura 1. Variación de la presión atmosférica con la altura sobre el nivel del mar.

Lapuerta y colaboradores [1, 2], demostraron que la composición del aire sufre ligeras variaciones con la altitud, partiendo de la suposición que el aire se comporta como un gas ideal y que se tiene un perfil isotérmico de la columna de aire situada encima la altura a la que se determina su composición, sin tomar en cuenta los procesos difusionales en el sentido vertical, que tienden a uniformar su composición.

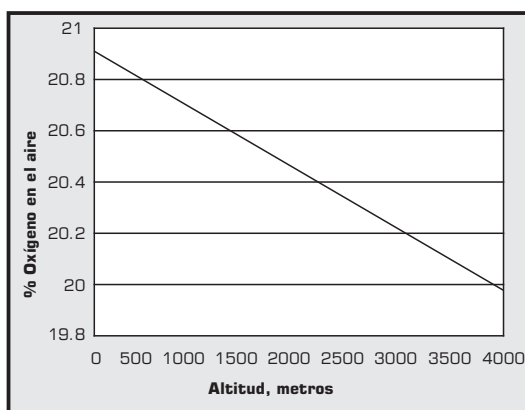


Figura 2. Composición del aire en función de la altura sobre el nivel del mar, temperatura de 20 °C, calculada con los datos de Lapuerta [1, 2]

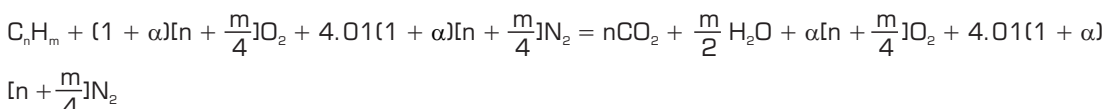
Tabla 1. Composición y concentración promedio del aire en diferentes ciudades de Bolivia

Ciudad	Altitud m.s.n.m.	Temperatura promedio °C [3]	Presión Atm.	Composición del aire			Concentración de oxígeno mol/m ³
				% O ₂	% N ₂	N ₂ /O ₂	
Tarija	1,854	18.28	0.804	20.5	79.5	3.885	6.84
Cochabamba	2,574	17.89	0.739	20.3	79.7	3.930	6.23
Sucre	2,801	14.55	0.713	20.2	79.8	3.946	5.99
La Paz	3,650	12.96	0.647	20.0	80.0	4.00	5.38
Oruro	3,735	9.89	0.637	19.97	80.03	4.01	5.29
Potosí	4,070	8.23	0.610	19.9	80.1	4.03	5.04

3. Efectos sobre la combustión

La combustión tiene un sin número de aplicaciones tanto a nivel doméstico como industrial, y el estudio del efecto de la altura sobre este proceso es importante debido a que los equipos de combustión (quemadores, cocinas, motores, estufas, calefones, etc.) han sido generalmente diseñados para prestar servicios en condiciones atmosféricas normales. Al realizarse la combustión en altura, los equipos, instalaciones y sistemas diseñados para operar en condiciones normales, tienen un decaimiento en su eficiencia, si no se compensan los factores que resultan afectados por la altitud del lugar donde se realiza la combustión.

La tabla 1, muestra que el radio molar N₂/O₂ en el aire se incrementa con la altitud, lo que ocasiona que se tenga una reacción química de combustión con diferentes coeficientes estequiométricos para cada altura considerada. Así, la reacción de combustión en la ciudad de Oruro (3,735 m.s.n.m) es:



Cuando se realiza la combustión en altura, se requiere una cantidad mayor de aire con relación a la necesaria en condiciones normales, lo que incrementa el contenido de nitrógeno en los gases de combustión, con un consecuente incremento en la cantidad de éstos.

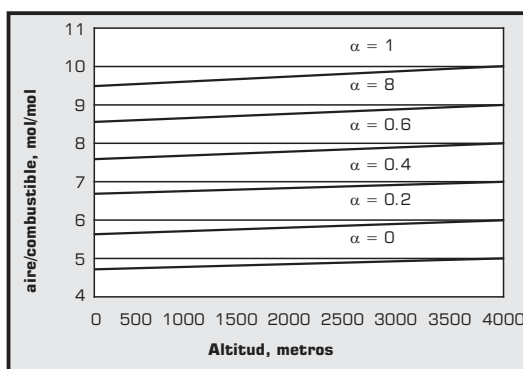


Figura 3. Ratio molar aire/combustible para un combustible de fórmula C_nH_m.

Uno de los parámetros que permite ver la incidencia de la altitud sobre la temperatura que se puede alcanzar en la combustión, es la temperatura adiabática de llama, que es la temperatura máxima teórica que se puede alcanzar al quemar una mezcla de combustible y aire bajo determinadas condiciones. Como se observa en la figura 4, la temperatura adiabática de llama disminuye con la altitud.

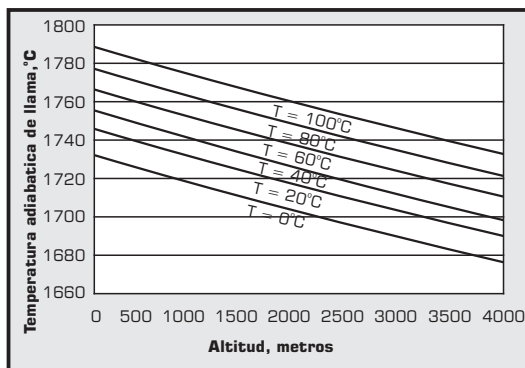


Figura 4. Temperatura adiabática de llama para la combustión de metano puro con aire estequiométrico precalentado a diferentes temperaturas.

El calor útil generado por la combustión, es también afectado por la altitud del lugar donde se quema el combustible. Una medida de la energía disponible es el factor de utilización de calor, que se define como:

$$Fu = 1 - \frac{\text{Calor sensible de los productos de combustión}}{\text{Poder calorífico inferior del combustible}}$$

En la figura 5 se compara el factor de utilización de calor a diferentes altitudes, en esta figura se puede ver que la disminución en el contenido de oxígeno en el aire debido a la altitud, tiene un ligero efecto sobre el factor de utilización de calor.

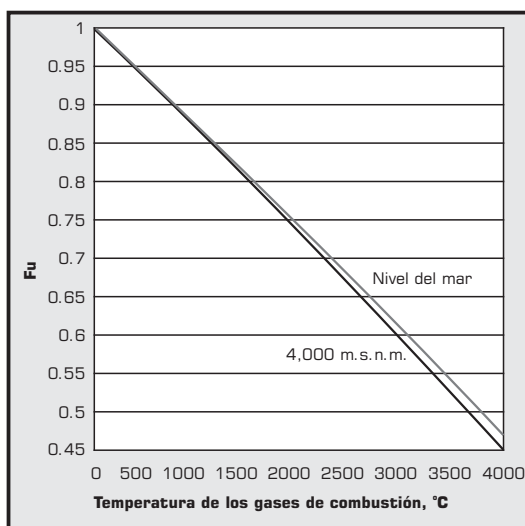


Figura 5. Factor de utilización del calor generado por la combustión de metano, a diferentes temperaturas de los gases de combustión, 20% de exceso de aire.

Desde el punto de vista químico, la combustión es una reacción química de oxidación del combustible, cuya forma general para un combustible de fórmula C_nH_m es representada por la reacción 1), la cual es exotérmica e irreversible.

La velocidad con la que se genera el calor como consecuencia de la oxidación del combustible, es igual a la expresión:

$$\text{Velocidad de generación de calor: } -r_c \cdot Q^i \cdot V$$

En la que: $-r_c$ es la velocidad de la combustión, Q^i el poder calorífico inferior del combustible, y V el volumen del combustor.

La velocidad de combustión depende de la concentración del aire y del combustible, en el caso de que éste sea un gas. En el caso de combustibles sólidos, es función de la concentración del aire y del área del sólido. Al disminuir la concentración y la fracción molar de oxígeno por la altitud, la reacción química se hace más lenta, y por tanto, la velocidad de liberación de calor es menor que cuando la combustión se realiza a presión normal, lo cual incide en las propiedades de la llama como por ejemplo, en la velocidad de deflagración, la cual es definida como la rapidez con la que se transmite la combustión desde la zona donde se inicia la reacción hacia las zonas de mezcla aire/combustible aún no reaccionadas. La presión a la que se encuentra la zona de combustión y la temperatura de la mezcla aire/combustible dependen de la altitud donde se desarrolle la llama, y por lo tanto, existe una dependencia entre la velocidad de deflagración y la altitud.

Amell y colaboradores [4], han medido de manera experimental la velocidad de deflagración de mezclas aire/gas natural a diferentes altitudes, demostrando que existe una tendencia de disminución en el valor de este parámetro cuando se incrementa la altitud del sitio donde se realiza la combustión, como se puede ver en la siguiente tabla.

Tabla 2. Valores promedio de la velocidad de deflagración a cada altura evaluada [4]

Altitud (m)	Presión atmosférica (bar)	Temperatura promedio, °C	Velocidad de deflagración (cm/s)
40	997	28.03	26.69
550	948	28.67	25.92
1,020	895	24.97	25.54
1,550	852	23.77	24.42
2,040	789	22.63	25.04

La altitud del sitio en el que se desarrolla la combustión tiene también afecta la potencia térmica desarrollada en la boca del quemador. Si se considera que la presión de suministro, la composición química de combustible y la geometría del inyector, la potencia térmica es función de las condiciones atmosféricas del sitio donde se opera el quemador, particularmente de la presión atmosférica, la cual depende la altura sobre el nivel del mar.

Los resultados experimentales obtenidos por Amell [5], muestran que la altitud donde se realiza la combustión, afecta de manera adversa la potencia térmica desarrollada. Este investigador concluye que la potencia desarrollada en la combustión, disminuye en aproximadamente 1.5% por cada 304 metros de incremento de altitud.

Tabla 3. Potencia promedio determinada a diferentes altitudes [5]

Altitud, metros	Gas Natural, kW	Butano, kW
555	1.643	1.579
1,550	1.584	1.495
2,340	1.480	1.435

4. Conclusiones

El trabajo presenta un estudio del efecto de la altitud sobre el proceso de combustión con fines de producir calor, y en el se han tomado en cuenta las variaciones de presión, de temperatura, y de composición del aire.

La altitud sobre el nivel del mar ejerce efectos tanto sobre la presión y temperatura atmosféricas, así como sobre la concentración de oxígeno en el aire y la composición de éste.

La composición del aire afecta a la relación estequiométrica aire/combustible, y como consecuencia, al volumen de los gases de combustión producidos, lo que se manifiesta en una disminución de la temperatura adiabática de llama y el factor de utilización del combustible cuando la combustión se realiza en localidades situadas en altura sobre el nivel del mar, con referencia a las combustiones en condiciones de presión normal.

La disminución de la presión atmosférica con la altitud, disminuye la concentración de los gases reaccionantes, lo que ocasiona que la reacción de combustión sea más lenta en comparación con la que se tiene a presión normal, y por lo tanto el flujo de energía desde el quemador hacia el medio circundante sea también menor.

Debido a la reducción de la densidad de la mezcla aire/combustible con la presión atmosférica, la potencia térmica de los quemadores atmosféricos se reduce.

Puesto que existe una menor disponibilidad de oxígeno a medida que aumenta la altitud, la combustión se hace más lenta y la llama es más fría, y se pueden alcanzar límites críticos de emisiones de monóxido de carbono debido a combustión incompleta.

Otros tipos de problemas tienen que ver con la inestabilidad de la llama, dificultades de ignición y pérdidas de propiedades radiantes.

5. Bibliografía

- 📖 LAPUERTA, Magín; ARMAS, Octavio; AGUDELO, John; SÁNCHEZ, Carlos. "Estudio del efecto de la altitud sobre el comportamiento de motores de combustión interna. Parte 1. Funcionamiento". Información Tecnológica, Vol. 17, N° 5, La Serena - Chile, 2006.
- 📖 LAPUERTA, Magín; ARMAS, Octavio; AGUDELO, John; AGUDELO, Andrés. "Estudio del efecto de la altitud sobre el comportamiento de motores de combustión interna. Parte 2. Motores diesel". Información Tecnológica, Vol. 17, N° 5, La Serena - Chile, 2006.
- 📖 INSTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICA. ine.gob.bo.

- AMELL ARRIETA, Andrés; GARCIA POSADA, Jorge; QUILINDO V., Arvey, HENAO VALLEJO, Diego. "Influencia de la altitud sobre la velocidad de deflagración del gas natural". Revista Facultad de Ingeniería N° 32, pp 78-81. Universidad de Antioquía, Colombia, 2004.
- AMELL ARRIETA, Andrés; AGUDELO, Jhon, CORTEZ, Jaime. "Verificación experimental del efecto de la altitud sobre la potencia térmica de un quemador atmosférico". Revista Facultad de Ingeniería N° 25, pp 26-35. Universidad de Antioquía, Colombia, 2002.
- VELASCO VILLARROEL, Javier. "Efecto de la altura de la ciudad de Oruro sobre el consumo de combustible para la generación de calor". Tesina de graduación. Oruro, 2004.
- VELASCO H. Carlos. Hornos Metalúrgicos. Parte I; Facultad Nacional de Ingeniería. Universidad Técnica de Oruro. 2010.