

# Efectos de la altitud sobre la combustión

**Carlos Velasco Hurtado**

Carrera de Ingeniería Metalúrgica, Universidad Técnica de Oruro  
cvelascohu@yahoo.es

**Javier Velasco Villarroel**

Postgrado de Física, Universidad Mayor de San Andrés

## Resumen

Los procesos de combustión se ven afectados por la altitud donde se desarrollan. 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, ocasionando una afectación del proceso de combustión con relación al que se realiza en condiciones de presión normal.

En el trabajo se estudia el efecto de la altitud sobre las propiedades del aire, y como éstas influyen sobre los parámetros de combustión como: 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.

**Palabras clave:** Combustión, altitud, exceso de aire, composición del aire, temperatura de llama, potencia térmica.

## Effects of altitude in the combustion

### Abstract

Combustion processes are affected by the altitude of the location where they take place. Altitude above sea level exerts effects on both atmospheric pressure and temperature, also in the oxygen concentration in the air and in the composition of this, affecting the combustion process in relation with the one which takes place at sea level under normal pressure.

In this work the effect of altitude on air properties is studied, and how it influences the combustion parameters such as: flame temperature, the fuel utilization factor, burning rate and its impact on the speed of deflagration and thermal combustion power.

**Keywords:** Combustion, altitude, air excess, air composition, flame temperature, thermal power.

## Efeitos da altitude sobre a combustão

### Resumo

Os processos de combustão são afetados pela altitude do local onde elas ocorrem. Altitude acima do nível do mar exerce efeitos sobre a pressão atmosférica e a temperatura, também na concentração de oxigênio no ar e na composição de este, afetando o processo de combustão em relação ao que ocorre ao nível do mar em condições normais de pressão.

Neste trabalho o efeito da altitude nas propriedades do ar é estudado, e como estes influenciam os parâmetros de combustão, tais como: a temperatura de chama, o fator de utilização de combustível, a taxa de queima e o seu impacto na velocidade de deflagração e a potência térmica de combustão.

**Palavras chave:** Combustão, altitude, excesso de ar, composição do ar, temperatura de chama, potência térmica.

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, como se indica en la siguiente figura.

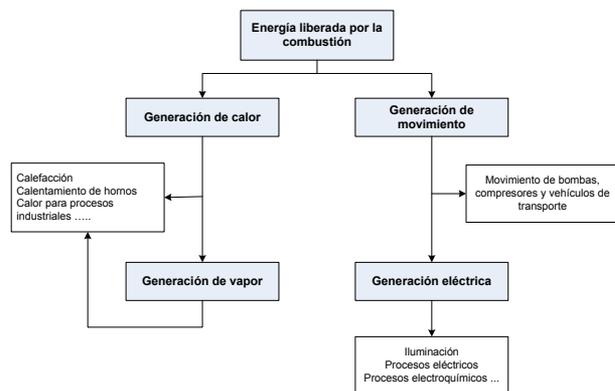
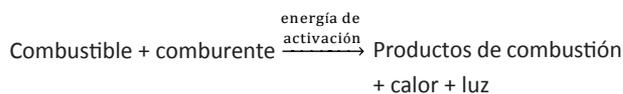


Figura 1. Usos de los combustibles.

Para que suceda la combustión, se requiere que simultáneamente se tengan las siguientes condiciones:

- El combustible.
- El comburente (generalmente es el oxígeno del aire).
- La energía de activación necesaria para iniciar el proceso.
- Las condiciones que hagan posible las reacciones químicas intermedias del proceso.

La combustión se puede representar de manera general por la reacción:



El proceso de combustión puede ser considerado como el resultado de un gran número de pequeñas explosiones que suceden por la interacción de cada molécula de combustible con el oxígeno. Cada una de estas explosiones descarga una pequeña cantidad de calor; la suma de estas pequeñas explosiones es lo que da lugar a la aparición de la llama.

La importancia de estudiar el efecto de la altitud sobre los parámetros característicos de la combustión, radica en 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. Combustión a nivel del mar

Todos los combustibles para generar la combustión, requieren un comburente que en la mayoría de los casos es el aire atmosférico. La composición del aire seco a nivel del mar es el siguiente:

Tabla 1. Composición del aire atmosférico seco.

Componente	% en volumen	ppm en volumen
Nitrógeno	78.084 ± 0.004	
Oxígeno	20.946 ± 0.002	
Anhídrido carbónico	0.033 ± 0.001	
Argón	0.934 ± 0.001	
Neón		18.18 ± 0.04
Helio		5.24 ± 0.004
Kriptón		1.14 ± 0.01
Xenón		0.087 ± 0.001
Hidrógeno		0.05 ± 0.001
N <sub>2</sub> O		0.5 ± 0.001

Para efectos prácticos, se considera que los componentes del aire son exclusivamente nitrógeno y oxígeno, atribuyendo al primero las pequeñas cantidades de los otros inertes. En base molar o volumétrica en condiciones normales (1 atm y 0 °C), las proporciones de estos elementos en el aire se considera que son:

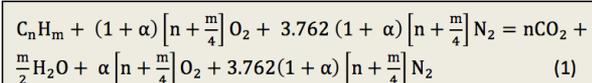
Oxígeno	21%
Nitrógeno	79%

En peso, las proporciones de los componentes son las siguientes:

Oxígeno	23.3%
Nitrógeno	76,7%

La masa molar calculada del aire es de 28.93 g/mol, y su densidad en condiciones normales es de  $\rho = 1.293 \text{ kg/m}^3$ .

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, H el número de átomos de hidrógeno y  $\alpha$  el exceso de aire, escrito como fracción.

De esta reacción general, se puede ver que las relaciones de interés en los cálculos de combustión son las siguientes:

$$\frac{\text{Aire}}{\text{Combustible}} = \frac{4.762(1+\alpha)\left[n + \frac{m}{4}\right]}{1} \frac{\text{mol}}{\text{mol}}, \frac{\text{volumen}}{\text{volumen}}$$

$$\text{Oxígeno teórico} = n + \frac{m}{4}$$

$$\text{Oxígeno en exceso} = \alpha \left[ n + \frac{m}{4} \right]$$

$$\text{Oxígeno total} = (1 + \alpha) \left[ n + \frac{m}{4} \right]$$

$$\text{Aire teórico} = 4.762 \left[ n + \frac{m}{4} \right]$$

$$\text{Aire total} = 4.762(1 + \alpha) \left[ n + \frac{m}{4} \right]$$

$$\text{Volumen de gases} = V_G = n + \frac{m}{2} + \alpha \left[ n + \frac{m}{4} \right] + 3.762(1 + \alpha) \left[ n + \frac{m}{4} \right]$$

Composición porcentual de los gases de combustión:

$$\% \text{CO}_2 = \frac{n}{V_G} * 100$$

$$\% \text{H}_2\text{O} = \frac{m}{V_G} * 50$$

$$\% \text{O}_2 = \frac{\alpha \left[ n + \frac{m}{4} \right]}{V_G} * 100$$

$$\% \text{N}_2 = \frac{3.762(1+\alpha) \left[ n + \frac{m}{4} \right]}{V_G} * 100$$

## 2. Efectos de la altura

### 2.1 Presión atmosférica

Cuando se realiza la combustión a alturas sobre el nivel del mar, es necesario considerar la variación de presión atmosférica y su influencia sobre las propiedades del aire y los combustibles. Los combustibles sólidos y líquidos, prácticamente no ven afectadas sus propiedades por la altitud, y en el caso de los combustibles gaseosos, su mayor efecto es la disminución de su densidad.

La altitud sobre el nivel del mar afecta de manera significativa las propiedades del aire. Además de las variaciones de temperatura propias de las distintas capas de la atmósfera, la presión del aire disminuye a medida que crece la altura del punto de medida, debido a la reducción del peso de la columna que soporta por encima, así como a la menor densidad del aire que la ocupa.

El valor de la presión atmosférica a diferentes alturas puede ser calculada por la expresión:

$$P = P_o e^{-\frac{M_a g h}{RT}} \quad [2]$$

En esta expresión,  $M_a$  es el peso molecular del aire,  $g$  la aceleración de la gravedad,  $h$  la altura sobre el nivel del mar,  $R$

la constante universal de los gases y  $T$  la temperatura absoluta. En la figura 2, se muestra la variación de presión atmosférica hasta la altura de 4,000 metros sobre el nivel del mar.

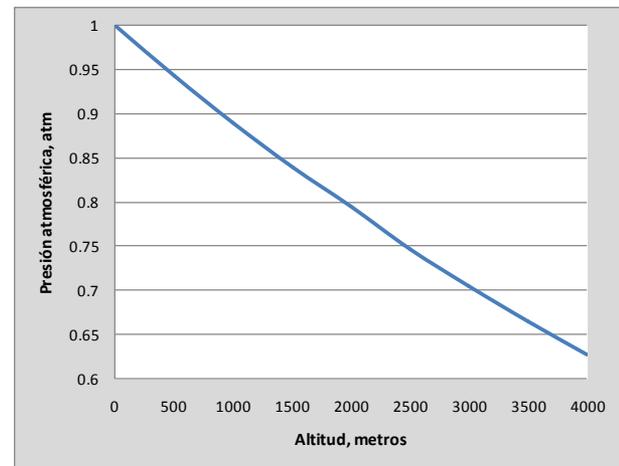


Figura 2. Variación de la presión atmosférica con la altura sobre el nivel del mar, temperatura de 20 °C.

### 2.2 Composición y densidad del aire

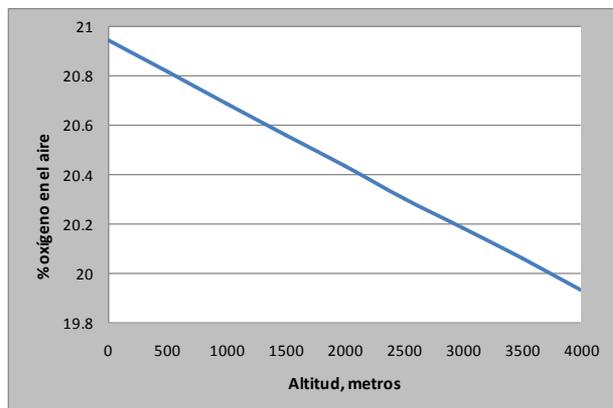
Las condiciones atmosféricas afectan los sistemas de combustión, ya que de ellas dependen las propiedades del aire empleado como comburente. La disminución de la presión atmosférica afecta a la densidad del aire y su composición, y como consecuencia, los procesos de combustión que emplean aire como comburente que se desarrollan en altura, también son afectados.

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.

Según estos investigadores, la fracción molar de oxígeno en el aire a diferentes alturas puede ser calculada usando la siguiente relación:

$$X_{O_x} = 0.20946 e^{-\frac{g h}{RT}} (M_{O_x} - M_a) \quad [3]$$

Como se observa en la figura 3, la fracción molar de oxígeno en el aire ( $X_{O_x}$ ), disminuye con la altitud, debido a que la molécula de oxígeno (32 g/mol), es más pesada que el aire (28.93 g/mol), y la fracción molar de nitrógeno incrementa ligeramente al ser más liviana que el aire (28 g/mol)



**Figura 3.** Composición del aire en función de la altura sobre el nivel del mar, temperatura de 20 °C.

La reducción de la proporción de oxígeno del aire con la altitud, tiene como consecuencia una modificación de la relación molar estequiométrica entre aire y combustible, lo que provoca modificaciones en los parámetros de trabajo del proceso de combustión en relación a los valores calculados a nivel del mar, como se mostrará más adelante.

La concentración del oxígeno en el aire disminuye con la altitud, debido a un efecto combinado de la reducción de su fracción molar como por una disminución de la densidad debido al incremento de volumen del aire con la disminución de la presión.

La concentración del oxígeno en el aire, se calcula a partir de la fórmula:

$$C_{O_2} = \frac{n_{O_2}}{V} = \frac{X_{O_2} P}{V}$$

La presión atmosférica se calcula con la ecuación (2), la fracción molar de oxígeno con la ecuación (3), el volumen del aire real  $\bar{V}$ , puede calcularse utilizando la ecuación de Van der Waals:

$$\left[ P - \frac{a}{\bar{V}^2} \right] (\bar{V} - b) = RT$$

En la que  $a$  y  $b$  son las constantes de Van der Waals, características de cada especie gaseosa. Para una temperatura constante, el volumen de un gas real en función de la presión atmosférica viene a ser la raíz real positiva de la ecuación cúbica:

$$P \bar{V}^3 - (bP + RT)\bar{V}^2 + a\bar{V} - ab = 0$$

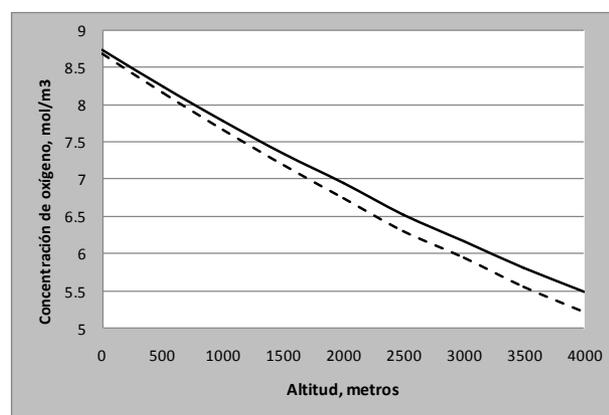
Para el aire:

$$a = 1.33 \frac{\text{atm l}^2}{\text{mol}^2};$$

$$b = 0.0366 \text{ mol}^{-1}$$

Las concentraciones de oxígeno a diferentes alturas sobre el nivel del mar son mostradas en la figura 4, en la que se muestra que a medida que se incrementa la altitud, la concentración de oxígeno disminuye, y que cuando se supone que el aire tiene una composición constante independiente de la altura con 21%  $O_2$  y 79%  $N_2$  y un comportamiento de gas ideal, se obtienen concentraciones mayores para un mismo valor de altitud que cuando se considera que el aire es un gas real que varía su composición con la altitud.

La Cordillera de los Andes atraviesa Bolivia en una buena proporción de su territorio, lo que ocasiona que se hayan asentado poblaciones en diferentes lugares de la misma, con sus principales ciudades situadas en altura respecto al nivel del mar. En la tabla 2, se resumen las propiedades del aire en estas ciudades.



**Figura 4.** Concentración de oxígeno en el aire a diferentes alturas sobre el nivel del mar. La línea continua se ha calculado considerando que el aire se comporta como gas ideal y que tiene composición constante (21%  $O_2$  y 79%  $N_2$ ). La línea segmentada es para un comportamiento de gas real, con fracción de oxígeno según la ecuación [2]. Temperatura del aire de 20 °C.

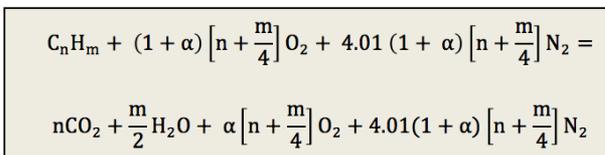
### 3. Efectos sobre la combustión

Como se mostró en la figura 1, 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, calefactores, 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, tendrán un decaimiento en su eficiencia, si no se compensan los factores que resultan afectados por la altitud del lugar donde se realiza la combustión.

**Tabla 2.** 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 <sup>3</sup>
				% O <sub>2</sub>	% N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	
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

La tabla 2 muestra que el radio molar N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> en el aire se incrementa con la altitud por el decrecimiento de su contenido de oxígeno, lo que ocasiona que se tenga una reacción química de combustión con diferentes coeficientes estequiométricos para cada altura considerada, tomando en cuenta la variación de la composición del aire con la altitud. Así, la reacción de combustión en la ciudad de Oruro (3,735 m.s.n.m) es:



Los parámetros de combustión que se pueden derivar de esta reacción son:

$$\frac{\text{Aire}}{\text{Combustible}} = \frac{5.01(1+\alpha) \left[ n + \frac{m}{4} \right]}{1} \frac{\text{mol}}{\text{mol}}, \frac{\text{volumen}}{\text{volumen}}$$

$$\text{Oxígeno teórico} = n + \frac{m}{4}$$

$$\text{Oxígeno en exceso} = \alpha \left[ n + \frac{m}{4} \right]$$

$$\text{Oxígeno total} = (1 + \alpha) \left[ n + \frac{m}{4} \right]$$

$$\text{Aire teórico} = 5.01 \left[ n + \frac{m}{4} \right]$$

$$\text{Aire total} = 5.01(1 + \alpha) \left[ n + \frac{m}{4} \right]$$

$$\text{Volumen de gases} = VG = n + \frac{m}{2} + \alpha \left[ n + \frac{m}{4} \right] + 4.01(1 + \alpha)$$

$$\left[ n + \frac{m}{4} \right]$$

Composición porcentual de los gases de combustión:

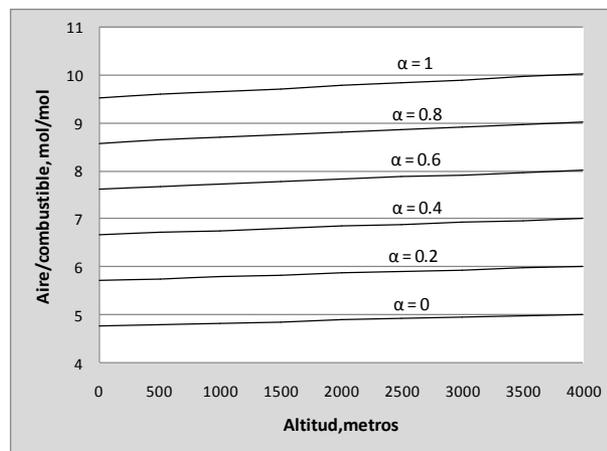
$$\% CO_2 = \frac{n}{VG} * 100$$

$$\% H_2O = \frac{m}{VG} * 50$$

$$\% O_2 = \frac{\alpha \left[ n + \frac{m}{4} \right]}{VG} * 100$$

$$\% N_2 = \frac{4.01 (1 + \alpha) \left[ n + \frac{m}{4} \right]}{VG} * 100$$

Comparando estos parámetros con los obtenidos para el caso de la combustión a nivel del mar, podemos concluir que 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 5.** Ratio molar aire/combustible para un combustible de fórmula C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>.

En la figura 5 se puede ver que los valores de la relación molar aire/combustible se incrementan con la altitud, y este efecto es más notable cuanto mayor es el exceso de aire utilizado.

La influencia de la disminución de la densidad del aire sobre su volumen, se puede apreciar en la figura 6, en la que se ha graficado el ratio volumen de aire/volumen de aire en condiciones normales, para diferentes alturas sobre el nivel del mar, y para diferentes temperaturas del aire precalentado.

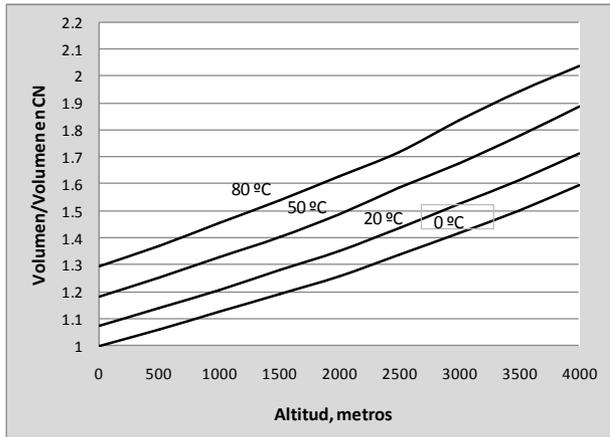


Figura 6. Corrección de volumen del aire por altitud.

Los ingenieros metalurgistas y de procesos, utilizan los combustibles como fuente de energía para el calentamiento de hornos y reactores que trabajan a temperaturas sobre la temperatura ambiente, y su principal interés es obtener las temperaturas deseadas con el uso de la menor cantidad posible de combustible, a fin de conseguir una economía del proceso.

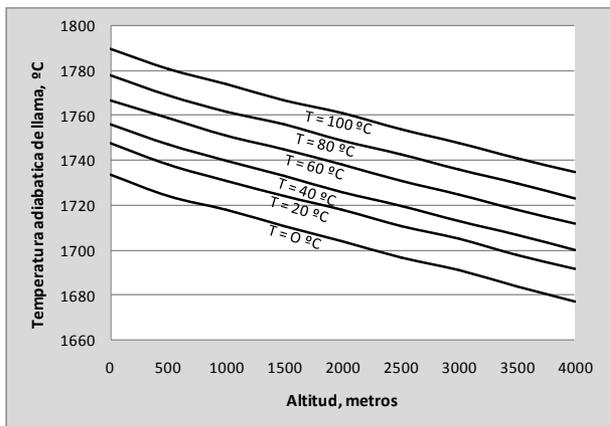


Figura 7. Temperatura adiabática de llama para la combustión de metano puro con aire estequiométrico precalentado a diferentes temperaturas.

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 7, la temperatura adiabática de llama disminuye con la altitud, pero éste decrecimiento tiene un efecto menor comparado con la disminución de temperatura ocasionada por el exceso de aire, que aumenta el volumen de los gases de combustión y como consecuencia baja la temperatura de la llama, como se ve en la figura 8.

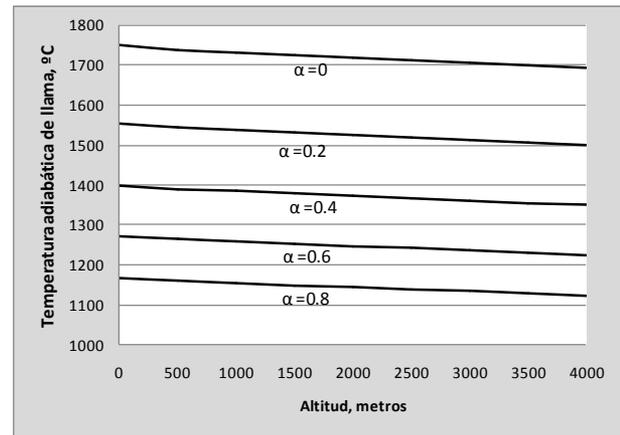


Figura 8. Temperatura adiabática de llama para la combustión de metano a diferentes alturas sobre el nivel del mar, y diferentes excesos de aire.

El proceso de combustión genera gases de proceso, los cuales almacenan una parte del calor generado por la combustión bajo la forma de calor sensible. El calor disponible o útil, es el calor generado por la combustión, al cual se le ha restado el calor sensible de los gases de combustión producidos.

Una medida del calor disponible es el factor de utilización de calor, que se define como:

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

En las figuras 9 y 10 se compara el factor de utilización de calor a diferentes altitudes. En estas figuras 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, que es menor al efecto que tiene la utilización de un exceso de aire en la mezcla aire/combustible.

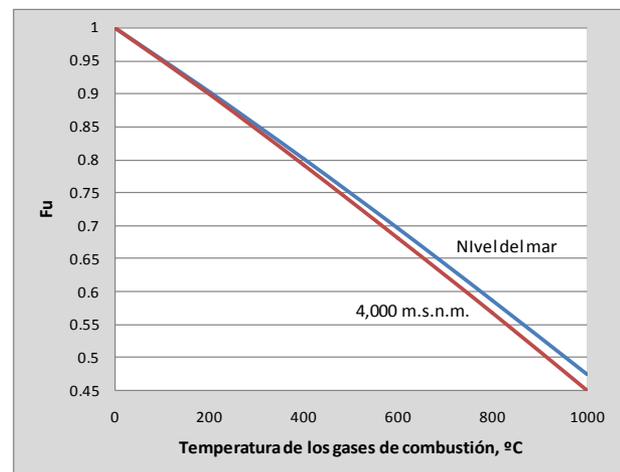
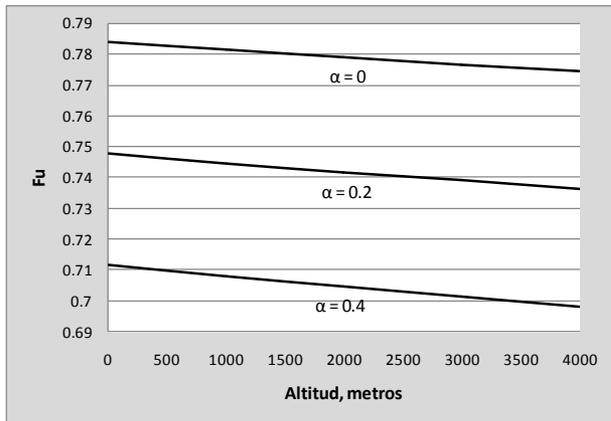


Figura 9. Factor de utilización del calor generado por la combustión de metano, a diferentes temperaturas de los gases de combustión, 20% de exceso de aire.



**Figura 10.** Factor de utilización de calor para la combustión de metano, a una temperatura de los gases de combustión de 500 °C, y diferentes excesos de aire.

#### 4. Velocidad de generación de calor y potencia de combustión

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<sub>n</sub>H<sub>m</sub> 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<sub>c</sub> Velocidad de la combustión.
- Q<sub>i</sub> Poder calorífico inferior del combustible.
- V Volumen del combustor.

Si el combustible es gaseoso, la combustión es una reacción química homogénea que tiene una ecuación cinética general simplificada de la forma:  $-r_c = k \cdot C_{C_nH_m}^a \cdot C_{O_2}^b$

Donde:

- k Constante de velocidad de reacción química
- C<sub>C<sub>n</sub>H<sub>m</sub></sub> Concentración molar del combustible
- C<sub>O<sub>2</sub></sub> Concentración de oxígeno
- a,b Orden de la reacción respecto al combustible y el oxígeno, respectivamente.

Para una comparación de la velocidad de combustión a nivel del mar, donde se tiene una atmósfera de presión, con la combustión en altura, se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- La constante de velocidad es independiente de la presión, depende únicamente de la temperatura.
- El aire normal está formado por 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno en volumen, con una relación N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> de 3.762. El contenido de oxígeno disminuye con la altitud, incrementando el valor del ratio N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>.
- La presión parcial de los componentes de una mezcla gaseosa esta dada por la relación:

$$P_i = X_i \cdot P$$

En esta expresión. X<sub>i</sub> es la fracción molar del componente i en la mezcla, y P el valor de la presión atmosférica.

- En la boca del quemador antes de la combustión, para la mezcla aire seco /combustible se tiene:

$$P_{O_2} + P_{N_2} + P_{C_nH_m} \cong P$$

La reacción química de combustión (1), muestra que para quemar un mol de C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>, son necesarios  $(1 + \alpha) \left[ n + \frac{m}{4} \right]$  moles de oxígeno. Por mol de combustible C<sub>n</sub>H<sub>m</sub> se alimentan al quemador los siguientes volúmenes de oxígeno y nitrógeno en el aire de combustión:

**Tabla 3.** Composición de los gases en la mezcla aire/combustible alimentada al quemador.

Especie	Número de moles	Fracción molar
C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	1	$X_{C_nH_m} = \frac{1}{S}$
O <sub>2</sub>	$(1 + \alpha) \left[ n + \frac{m}{4} \right]$	$X_{O_2} = \frac{(1 + \alpha) \left[ n + \frac{m}{4} \right]}{S}$
N <sub>2</sub>	$\beta(1 + \alpha) \left[ n + \frac{m}{4} \right]$	$X_{N_2} = \frac{\beta(1 + \alpha) \left[ n + \frac{m}{4} \right]}{S}$
Total	$S = 1 + (1 + \beta)(1 + \alpha) \left[ n + \frac{m}{4} \right]$	1

En la tabla 3,  $\beta$  es el radio molar  $N_2/O_2$  que tiene un valor de 3.762 a nivel del mar, y que se incrementa con la altitud como se mostró anteriormente.

Las concentraciones de los gases reaccionantes son por lo tanto:

$$C_{C_nH_m} = \frac{n_{C_nH_m}}{V} = \frac{P_{CH_4}}{RT} = \frac{X_{C_nH_m} \cdot P}{RT}$$

$$C_{O_2} = \frac{n_{O_2}}{V} = \frac{P_{O_2}}{RT} = \frac{X_{O_2} \cdot P}{RT}$$

Como una vez que se inicia la combustión, las velocidades de reacción a presiones diferentes también son diferentes, y como la combustión libera gran cantidad de calor que eleva la temperatura del sistema, cuando se tenga una presión parcial del oxígeno más elevada, la temperatura del sistema será mayor, y por tanto, el valor de la constante de velocidad de reacción también será más grande que en caso de combustión con mezclas aire/combustible en las que la presión parcial de oxígeno es menor. Para tener condiciones que permitan comparar ambos tipos de combustión, se realiza el análisis de las velocidades iniciales de combustión, en las cuales  $k$  y  $T$  son las mismas para los dos sistemas considerados.

Las ecuaciones de la velocidad inicial de combustión en condiciones de presión atmosférica  $P$ , y de una altura sobre el nivel del mar con presión  $P'$ , son:

$$[-r_{C_nH_m}]_P = k \cdot \left[ \frac{P}{SRT} \right]^a \left[ \frac{(1+\alpha)[n+\frac{m}{4}] \cdot P}{SRT} \right]^b$$

$$[-r_{C_nH_m}]_{P'} = k' \cdot \left[ \frac{P'}{SRT} \right]^a \left[ \frac{(1+\alpha)[n+\frac{m}{4}] \cdot P'}{SRT} \right]^b$$

Dividiendo ambas expresiones miembro a miembro:

$$\frac{[-r_{C_nH_m}]_P}{[-r_{C_nH_m}]_{P'}} = \left[ \frac{P S''}{P' S} \right]^{a+b}$$

A presión atmosférica normal,  $P = 1$ , y debido a la disminución de la presión atmosférica con la altitud,  $P' < 1$ , por lo que el radio  $P/P'$  siempre es mayor a la unidad. En el caso del número total de los moles de los gases de combustión,  $S$ , como se muestra en la tabla 3, es función del radio  $N_2/O_2$ , que para alturas sobre el nivel del mar, tiene un valor ligeramente mayor al correspondiente al nivel del mar, por lo que  $S \cong S'$ . Lo que muestra que para la combustión en condiciones de presión menor, la velocidad inicial de combustión siempre es más lenta, lo que ocasiona que la liberación del calor generado por la combustión sea también más lenta, con temperaturas de llama menores, lo que posibilita que algunas reacciones químicas no se completen, y se tenga en algunos casos la emisión de gases contaminantes junto a los gases de combustión (por ejemplo, monóxido de carbono).

Esta velocidad inicial del proceso de combustión (que es función de la altitud), 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, que resume sus resultados experimentales.

**Tabla 4.** 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	0.997	28.03	26.69
550	0.948	28.67	25.92
1,020	0.895	24.97	25.54
1,550	0.852	23.77	24.42
2,040	0.789	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, y numerosos investigadores han mostrado el efecto de este parámetro [5, 6, 7, 8, 9].

Cuando una corriente de un combustible gaseoso se descarga por el orificio de un inyector de un quemador de premezcla, la potencia térmica disponible en función del poder calorífico inferior del combustible, puede ser calculada a partir de la siguiente relación desarrollada por Amell [10]:

$$Q_T = CA \sqrt{\frac{2p}{\rho_{st}d} \frac{P+p}{P_{st}} \frac{T_{st}}{T}} Q^i$$

Donde:

- $Q_T$ : Potencia térmica en kW
- $C$ : Coeficiente de descarga del inyector, depende de la configuración geométrica de éste y del régimen de flujo.
- $P$ : Presión manométrica del gas combustible, en Pa
- $P_{st}$ : Densidad del aire en condiciones estándar (25 °C y 101.325 Pa), en  $kg/m^3$ .
- $P_{st}$ : Presión absoluta en condiciones estándar (101.325 Pa)

- T: Temperatura del gas antes de la descarga en el inyector.  
 $T_{st}$ : Temperatura absoluta en el estado estándar (288 °K)  
 $Q_i$ : Poder calorífico inferior del combustible gaseoso, en kW.h/m<sup>3</sup>

Como se observa en esta ecuación, la potencia térmica disponible en el quemador de premezcla, depende de los siguientes factores:

- Condiciones atmosféricas del sitio donde opera el quemador: temperatura y presión atmosférica (altitud).
- Propiedades del gas combustible, poder calorífico y densidad (que varía con la altitud).
- La geometría del inyector.

“Si se considera que la presión de suministro, la composición química de combustible y la geometría del inyector no se modifican, la potencia térmica quedará en función de las condiciones atmosféricas del sitio donde se opera el quemador, particularmente de la presión atmosférica, la cual depende de la altura sobre el nivel del mar” [5].

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

**Tabla 5.** 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

## 5. 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.

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

La menor disponibilidad de oxígeno en lugares de altura aumentará la presencia de inquemados y productos de combustión incompleta si no se toman medidas que aseguren un buen contacto aire/combustible, una cantidad suficiente de oxígeno para la combustión y el desarrollo de una combustión estable.

Si bien la composición del aire varía con la altitud, su efecto sobre los parámetros de la combustión es menor que el efecto que tienen la variación de la concentración de oxígeno con la altitud o el exceso de aire; por lo que no se comete un error apreciable si se considera que la composición del aire se mantiene constante para alturas sobre el nivel del mar menores a 4,000 metros, con 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno.

## Referencias

1. 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*. La Serena - Chile: Vol. 17, Nº 5, 2006.
2. 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*. La Serena - Chile. Vol. 17, Nº 5, 2006.
3. INSTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICA. [ine.gov.bo](http://ine.gov.bo).

4. AMELLARRIETA, 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, Colombia: Universidad de Antioquía, pp 78-81, 2004.
5. 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. Colombia: Universidad de Antioquía, pp 26-35, 2002.
6. 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.
7. GAS RESEARCH INSTITUTE. "High altitude Instalation of natural gas-fired appliaces with fan-assisted combustion system". *American Gas Association Laboratories*. 1995.
8. KAM, V. P. "High altitude installation of gas-fired appliances". En: *International Gas Research Conference*. Francia: 6 al 9 de noviembre de 1995.
9. SHERIDAN, R. D. "The effect of altitude on de operation of gas appliance". *Gas Research Institute*. 1998.
10. AMELL A, Andrés. "Teoría de descarga en inyectores u orificios de combustibles gaseosos". Universidad de Antioquía, 2000.
11. MARQUEZ MARTINEZ, Manuel. *Combustión y quemadores*. España, Barcelona: Marcombo S. A. ISBN 84-267-0771-8. 1989.
12. MIRANDA BARRERAS, Angel, PUJOL, Ramon. *La Combustión*. España: Grupo Editorial CEAC. 1996. ISBN 84-239-6550-2.
13. BRIZUELA, E.; ROMANO, S. D. *Combustión*. Departamento de Ingeniería Mecánica y Naval. Facultad de Ingeniería, UBA. 2003.
14. VELASCO H. Carlos. *Hornos Metalúrgicos*. Parte I. Oruro - Bolivia: Facultad Nacional de Ingeniería. Universidad Técnica de Oruro. 2012.
15. EL-MAHALLAWY F; EL-DIN HABIK, S. *Fundamentals and technology of combustion*. Kidington, Oxford: ELSEVIER, Primera edición, 2002. ISBN 0-08-044106-8.