

# Influencia del aire húmedo en la combustión del metano

## Influence of the wet air on combustion of methane

Yamid Alberto Carranza-Sánchez<sup>1</sup>, Carlos Alberto Romero-Piedrahita<sup>2</sup>, Elkin Gregorio Flórez-Serrano<sup>3</sup>.

<sup>1,2</sup>Facultad de Tecnologías, Escuela de Tecnológica Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia.

yamidc@utp.edu.co

cromero@utp.edu.co

<sup>3</sup>Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pamplona, Pamplona, Norte de Santander Colombia.

eflorez@unipamplona.edu.co

**Resumen**— En este artículo se aborda el estudio teórico de la influencia de la humedad relativa y la temperatura del aire en la combustión del metano. La solución del sistema de combustión es realizada bajo las consideraciones de la termoquímica y sin considerar transporte y cinética química. La temperatura de llama y la composición de los gases de combustión son determinados en función de la humedad relativa y la temperatura del aire. Como es común encontrar cálculos de combustión basados en la consideración de aire seco, este artículo muestra que la humedad relativa y la temperatura del aire pueden tener una considerable influencia en las variables de la combustión.

**Palabras clave**— combustión, metano, aire húmedo, humedad relativa.

**Abstract**— In this paper a theoretical study on the influence of relative humidity and temperature of the air on the combustion of methane is discussed. The solution of the combustion system is carried out under the thermochemical considerations, and without considering transport and chemical kinetics. The flame temperature and the composition of the flue gases are determined as a function of relative humidity and temperature of the air. Since it is common to find combustion calculations based on the consideration of dry air, this paper highlights the significant influence that both the relative humidity and temperature of the air can have on the combustion variables.

**Key Word** — combustion, methane, wet air, relative humidity.

## I. INTRODUCCIÓN

Los combustibles fósiles son una fuente energética muy empleada en los diferentes sectores de la economía y, a nivel mundial, la relación reservas/producción (R/P) está

aproximadamente en un 40% para el petróleo, un 60% para el gas y un 120% para el carbón, y está aumentando. Eso genera un panorama de reserva de los recursos fósiles de alrededor de un siglo para el caso de gas y petróleo, y de dos o más para el caso del carbón [1].

La combustión de combustibles fósiles es empleada para múltiples aplicaciones de generación de energía térmica, desde el sector residencial, en el que se emplean generalmente gas natural o gas propano para la cocción de alimentos o el calentamiento de agua, hasta el sector industrial en el que se emplean combustibles sólidos, líquidos o gaseosos para la generación y uso del vapor en procesos productivos para la producción de potencia o de calor.

La combustión de combustibles convencionales ha permitido mejorar la calidad de vida de la sociedad, pero no se puede ignorar el impacto ambiental negativo producido por ese tipo de recurso energético debido a la generación de gases de efecto invernadero, entre otros [2]. Al considerar la importancia que la combustión tiene para la sociedad, resulta útil que el recurso humano encargado de diseñar, operar y mantener los diversos sistemas de combustión que se tienen en los procesos industriales tenga una noción sobre los fenómenos y las principales variables que afectan el proceso de combustión.

El proceso de combustión es en muchos sistemas de conversión de energía la principal fuente de energía y el área responsable de los mayores costos de producción. La eficiencia global de las instalaciones de conversión de energía que emplean la combustión como fuente primaria depende en buen grado de la eficiencia de este proceso. Un buen proceso de combustión permite realizar una mejor explotación de la energía química del combustible que se convertirá en energía calorífica y tener el menor efecto posible debido a la

contaminación ambiental. Es de tener en cuenta que actualmente hay tres pilares que rigen el buen desempeño de los procesos productivos: lograr una alta generación del producto del proceso, reducir los costos de fabricación del producto, y reducir el impacto ambiental implicado en la manufactura del producto. Estos conceptos tienen una relación directa con la necesidad de una sociedad eficiente y sustentable [3]. Como en diversas industrias la combustión influye en estos tres aspectos, especialmente en el último, existen regulaciones para limitar los impactos ambientales de los procesos de combustión y también hay recomendaciones técnicas para verificar un correcto funcionamiento de los equipos de combustión.

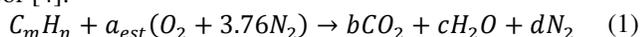
Hay factores externos al proceso de combustión, tal como la humedad del aire, que por un lado puede cambiar el estado de una buena combustión y de todos los procesos subsecuentes que dependen de éste o que, por otro lado y en procesos poco convencionales, puede aportar un potencial interesante de contenido de agua que podría ser extraída de los gases para ser usada en otros procesos. Existen operaciones de conversión de energía en las que la recuperación del contenido de agua de los gases de combustión puede representar la principal fuente de agua.

En este artículo se estudian algunas variables externas que intervienen en el proceso de combustión. Se investiga la influencia de la temperatura y humedad de aire sobre la temperatura adiabática de llama, las emisiones contaminantes y la cantidad de agua contenida en los productos de combustión. Los resultados generados constituyen una información útil para posteriores estudios de procesos de recuperación de calor de los gases de combustión, tratamiento pre-combustión para mejorar el desempeño térmico o ambiental de la combustión, recuperación del agua contenida en los gases de combustión, entre otros.

## II. GENERALIDADES DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN

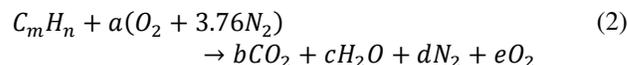
Se considera en la metodología de cálculo un modelo zero-dimensional con los productos de combustión como una mezcla de especies a la misma presión y temperatura. Generalmente, buena parte de la literatura aborda la combustión sin considerar el efecto de la humedad del aire y suelen despreciarse los efectos de disociación de especies. En este trabajo se considera el aire húmedo como variable de estudio y su efecto en el proceso de combustión.

El modelo de cálculo de combustión teórica o estequiométrica para un hidrocarburo con aire seco está dado por [4]:



donde  $C_m H_n$  es el hidrocarburo con  $m$  carbonos y  $n$  hidrógenos,  $a_{est} = m + n/4$  y es la cantidad de aire estequiométrica y para el metano ( $CH_4$ )  $m=1$  y  $n=4$ , y  $b$ ,  $c$  y  $d$  es el número de moles de  $CO_2$ ,  $H_2O$  y  $N_2$ , respectivamente.

Para el caso de quemadores industriales, estos suelen operar con un exceso de aire para compensar efectos como la mezcla no homogénea del combustible con el aire y, por ende, para aprovechar mejor la energía química del combustible. En una reacción teórica, el exceso de aire se manifiesta en una emisión de oxígeno libre en los productos de combustión:



donde  $a$  es la cantidad de aire que reacciona con el hidrocarburo. La relación aire-combustible estequiométrica  $AF_{est}$  de una mezcla puede ser expresada como [4]:

$$AF_{est} = 4.76 \cdot a_{est} \frac{PM_{aire}}{PM_{comb}} \quad (3)$$

donde  $PM_{aire}$  es el peso molecular de aire y  $PM_{comb}$  es el peso molecular del combustible. Para el caso del metano, el cual es el principal componente del gas natural, la relación aire-combustible estequiométrica es 17.2 [ $kg_{aire}/kg_{comb}$ ]. Para mezclas en las que no se tiene la condición estequiométrica, la relación aire-combustible  $AF$  es:

$$AF = 4.76 \cdot a \frac{PM_{aire}}{PM_{comb}} \quad (4)$$

Un parámetro muy utilizado en la combustión es la relación de equivalencia  $\phi$  la cual está dada por [4]:

$$\phi = \frac{AF_{est}}{AF} \quad (5)$$

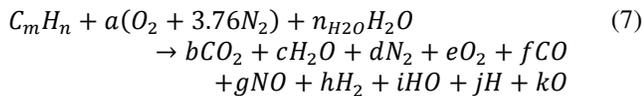
Una mezcla es rica si tiene mayor cantidad de combustible que la establecida por la estequiometría, que es equivalente a decir que la mezcla tiene una menor cantidad de aire que la recomendada para una combustión completa, de manera que para una mezcla rica  $\phi > 1$ . Por el contrario, una mezcla es pobre cuando la cantidad de combustible es menor a la recomendada por las condiciones estequiométricas, o lo que equivale a tener una mayor cantidad de aire que la recomendada por la estequiometría, de manera que para una mezcla pobre  $\phi < 1$ . Para una mezcla estequiométrica  $\phi = 1$ . El exceso de aire está relacionado con la relación de equivalencia por la expresión [4]:

$$\%Exceso = \frac{(1 - \phi)}{\phi} \cdot 100\% \quad (6)$$

Como se observa en la Ecuación (2), el exceso de aire se manifiesta con la aparición de una cantidad  $e$  de moles de  $O_2$  en los gases de combustión. Por ejemplo, en el análisis de eficiencia de las calderas, el exceso de aire es uno de los factores importantes para mantener un buen desempeño de los quemadores y su proceso de combustión. Según [5] y [6], el exceso de aire provee un factor de seguridad sobre la combustión realizada con una cantidad de aire teórico, también se usa para reducir la producción de  $CO$  y material particulado, y para reducir la formación de  $NO_x$  mediante el

control de la temperatura de llama. A mayor temperatura de llama la generación de  $NO_x$  se incrementa y este incremento se ve influenciado en mayor o menor medida dependiendo de la relación de equivalencia [7]. Por ejemplo, se considera que para un exceso de aire del 15%, equivalente a un valor de  $a=2.3$  en la Ecuación (2), la concentración de  $O_2$  en base seca (sin considerar el agua en los productos) sería del 3%.

El modelo de cálculo de combustión de un hidrocarburo con aire húmedo (aire seco + agua) y bajo la consideración de disociación y equilibrio químico de la reacción, puede expresarse mediante la siguiente ecuación:



En (7) puede observarse que se han considerado 10 especies que componen los gases de combustión [8]. Las especies adicionales a las encontradas en (2), son consecuencia de la disociación de productos como el  $CO_2, H_2O$  y  $N_2$ , disociación influenciada en gran parte por el incremento de temperatura. Los coeficientes  $b, c, d, e, f, g, h, i, j, k$  y en la Ecuación (7), corresponden a la composición molar de cada una de las especies generadas en la combustión. El número de moles de agua  $n_{H_2O}$  que ingresa con el aire húmedo en la combustión es determinado como:

$$n_{H_2O} = w \cdot 4.76 \cdot a \frac{PM_{aire}}{PM_{H_2O}} \quad (8)$$

donde  $w$  es la humedad específica del aire en kilogramos de vapor por kilogramos de aire seco [ $kg_v/kg_{gas}$ ] y  $PM_{H_2O}$  es el peso molecular del agua.

La solución de (7) es realizada bajo las consideraciones de la termoquímica, sin considerar transporte y cinética química, es decir, se asume que tanto el transporte de masa y especies, como la reacción química, se realizan infinitamente rápido. Esta metodología es ampliamente utilizada en los análisis termodinámicos de ciclos y sistemas que involucran equipos de combustión [9].

La temperatura de llama adiabática  $T_{llama}$  para un proceso a presión constante es determinada mediante la ecuación (9). Esta ecuación indica que en un proceso adiabático la entalpía absoluta de los reactantes  $H_{react}$  es igual a la entalpía absoluta de los productos  $H_{prod}$  [4].

$$H_{react}(T_i, P) = H_{prod}(T_{llama}, P) \quad (9)$$

### III. METODOLOGÍA

En este trabajo se ha empleado el programa computacional CEA-NASA<sup>®</sup> [10] para realizar el cálculo del equilibrio químico de la reacción, de la temperatura de los productos, su composición y propiedades termodinámicas. Este programa es una herramienta de acceso libre y su validez está referenciada en literatura especializada [8]. La Tabla 1 presenta una comparación entre los resultados generados por el programa

CEA-NASA<sup>®</sup> y los resultados obtenidos de manera teórica y de manera iterativa en la literatura con el fin de mostrar la validez del código computacional. Esta comparación está basada en el ejemplo 15.18 de la referencia [11], en el cual se estudia una aplicación de la combustión adiabática del metano con aire teórico y se considera la disociación del  $CO_2$ . Se comparan las variables fracción molar  $\chi$  y temperatura de llama adiabática  $T_{llama}$ . Puede observarse en la Tabla 3 que las diferencias tienen un error pequeño.

Variable	CEA-NASA	Literatura [11]	% error
$\chi_{CO_2}$	0.0842	0.0845	0.3
$\chi_{CO}$	0.0103	0.0101	2.7
$\chi_{O_2}$	0.0052	0.0050	2.7
$\chi_{H_2O}$	0.1891	0.1892	0.0
$\chi_{N_2}$	0.7111	0.7112	0.0
$T_{llama}$ [°C]	1984.3	1982.2	0.1

Tabla 1: Comparación de resultados entre el programa CEA-NASA y la literatura [11]

Para el análisis de la aplicación estudiada en este artículo, en el caso de los reactantes se ha considerado que la temperatura del combustible es igual a la temperatura del aire que ingresa a la combustión, y que el proceso de combustión ocurre a presión constante de 1 atm y sin transferencia de calor. Lo anterior permite establecer que la temperatura de llama calculada corresponde a la temperatura de llama adiabática [12]. Este proceso sin transferencia de calor o adiabático significa que nada de calor es perdido durante la reacción o que la reacción ocurre en una cámara perfectamente aislada.

El exceso de aire se ha considerado en dos valores: 10% y 15% con el objetivo de analizar lo que sucede en el caso de tener variaciones en el ajuste de aire de un quemador. La humedad relativa HR del aire se ha considerado en los valores de [%]: 0, 10, 20, 40, 60, 80 y 100. La temperatura de bulbo seco del aire se ha considerado en los siguientes valores [°C]: 10, 20, 30, 40, 50 y 60. Se han calculado las propiedades de los productos de combustión para las combinaciones de las condiciones mencionadas de los reactantes. Estas combinaciones son presentadas en Tabla 2 y se aplican para cada uno de los excesos de aire (10% y 15%).

HR [%]	Temperatura del aire [°C]					
<b>0</b>	10	20	30	40	50	60
<b>10</b>	10	20	30	40	50	60
<b>20</b>	10	20	30	40	50	60
<b>40</b>	10	20	30	40	50	60
<b>60</b>	10	20	30	40	50	60
<b>80</b>	10	20	30	40	50	60
<b>100</b>	10	20	30	40	50	60

Tabla 2: Condiciones de humedad relativa y temperatura

### IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la Fig. 1 se presenta el comportamiento de la temperatura de llama adiabática en función de la temperatura del aire ambiente (eje de las abscisas) y para diferentes

humedades relativas (eje de las ordenadas). Es muy importante resaltar que la temperatura de llama adiabática es calculada teniendo en cuenta la disociación de  $CO_2$  y  $N_2$ . Las líneas en trazos corresponden a un exceso de aire del 10% y las líneas continuas a un exceso de aire del 15%.

Según [7], la temperatura de llama de una combustión sin disociación para una mezcla estequiométrica de metano y aire a 298 K (25 °C) es 2210 K. Para el caso de la Fig. 1, la temperatura para la mezcla estequiométrica a 298 K y con 10% de exceso de aire es aproximadamente 2143 K, lo cual muestra que hay reducción en la temperatura de alrededor del 3% respecto a la temperatura de llama de la mezcla estequiométrica. Esta reducción es generada principalmente por el exceso de aire mientras que la disociación tiene un efecto reducido.

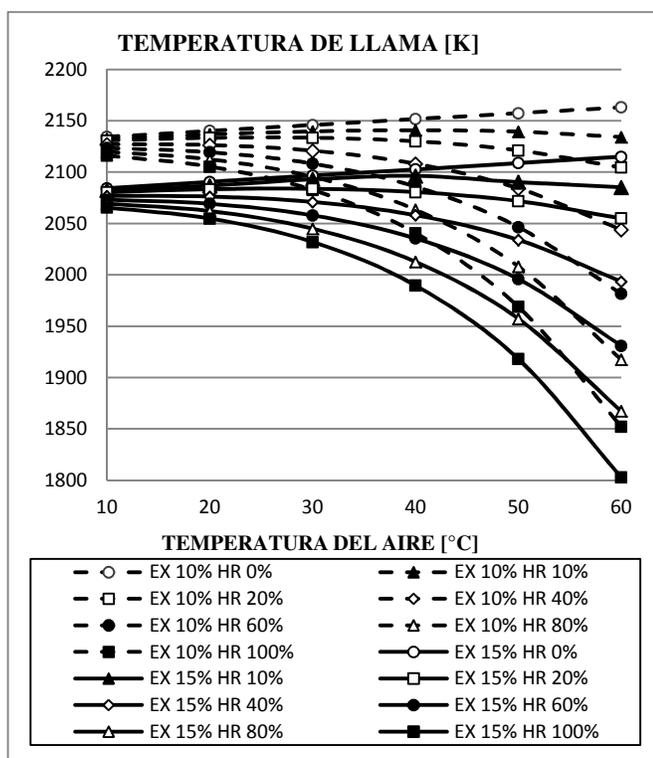


Figura 1. Temperatura de llama en función de la temperatura y de la humedad relativa del aire

En los casos de HR=0 para los dos excesos de aire, existe un incremento de la temperatura de llama a medida que el aire tiene una mayor temperatura. Para los dos excesos de aire, y considerando una HR del 10%, se observa que hay una tendencia inicial leve a incrementar la temperatura de llama cuando se aumenta la temperatura del aire, pero la temperatura vuelve a disminuir ligeramente. Para una HR del 20% hay una tendencia leve de reducción de la temperatura de llama a medida que se eleva la temperatura del aire, tendencia que se acentúa notablemente a medida que la HR del aire se torna mayor. Es muy común encontrar en literatura básica y especializada relacionada con las ciencias térmicas [13], [4], [8], ejemplos y ejercicios de cálculos de combustión que se

realizan con aire seco (HR=0), pero la Fig. 1 muestra que hay una variación no despreciable de la temperatura de llama con el incremento de la humedad relativa. Por ejemplo, este aspecto es de considerar cuando se realiza un balance energético en áreas y procesos que utilicen equipos de combustión. Como puede observarse en la Fig. 1, para similares HR, las temperaturas para un exceso de aire del 15% (líneas sólidas) son menores que las temperaturas para un exceso de aire del 10% (líneas seccionadas), lo cual es explicado la energía liberada por la combustión que es consumida internamente en el proceso para el calentamiento de la carga adicional de aire (la diferencia en el exceso de aire, o sea, el 5%).

Se observa también en la Fig. 1, que hay líneas de HR con exceso del 10% donde las temperaturas son inferiores a las que se tienen para algunas HR con exceso del 15%, como consecuencia de las cantidad de agua contenida en el aire. Por ejemplo, para un exceso de aire del 10%, una HR del 80% y una temperatura del aire de 60 °C, la temperatura de llama es inferior a la que se tiene con un exceso de aire del 15%, una HR del 60% y una temperatura del aire similar. Lo anterior permite establecer que la humedad relativa puede tener una influencia notable, que puede incluso superar la influencia del exceso de aire.

La Fig. 2 presenta el comportamiento de la fracción molar de CO en función de la temperatura del aire ambiente y para diferentes humedades relativas. Para ambas combustiones: con 10% y 15% de exceso de aire, y considerando una humedad relativa nula, es decir, aire seco, se presenta un incremento de la generación de CO con el aumento de la temperatura del aire. Esto está relacionado con el efecto de la disociación del  $CO_2$ , el cual es proporcional a la temperatura de llama.

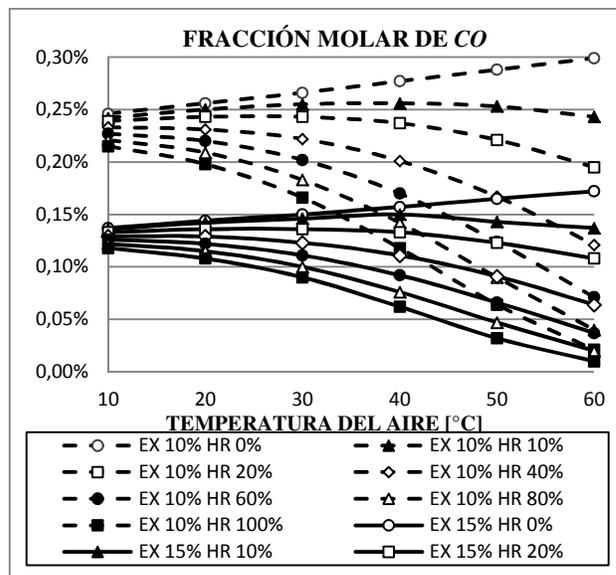


Figura 2. Fracción molar de CO en función de la temperatura y de la humedad relativa del aire

Se observan también las variaciones de CO con la humedad relativa. Por ejemplo, para una temperatura de aire fija de 40 °C, se tiene que para un 10% de exceso de aire la reducción debido al cambio de HR es mayor que la variación para el 15% de exceso de aire. Puede verse también que el abanico formado por las curvas para un exceso de aire del 10% es mayor que el formado para un exceso de aire del 15%.

Para el caso de la fracción molar de CO<sub>2</sub> en los gases de combustión, Fig. 3, se tienen variaciones cuya magnitud depende de la temperatura del aire y de la humedad relativa. A mayor humedad relativa y mayor temperatura del aire, la concentración de CO<sub>2</sub> se reduce con mayor intensidad para cualquiera de los dos excesos de aire. Cuando se tiene aire seco o con baja humedad relativa se presenta una leve disminución de CO<sub>2</sub> con el aumento de la temperatura del aire, mientras que a mayor humedad relativa, esa disminución se hace más considerable. Para una temperatura de aire constante se observa que la influencia de la humedad relativa y el exceso de aire en la reducción de CO<sub>2</sub> es mayor a medida que la temperatura del aire se incrementa.

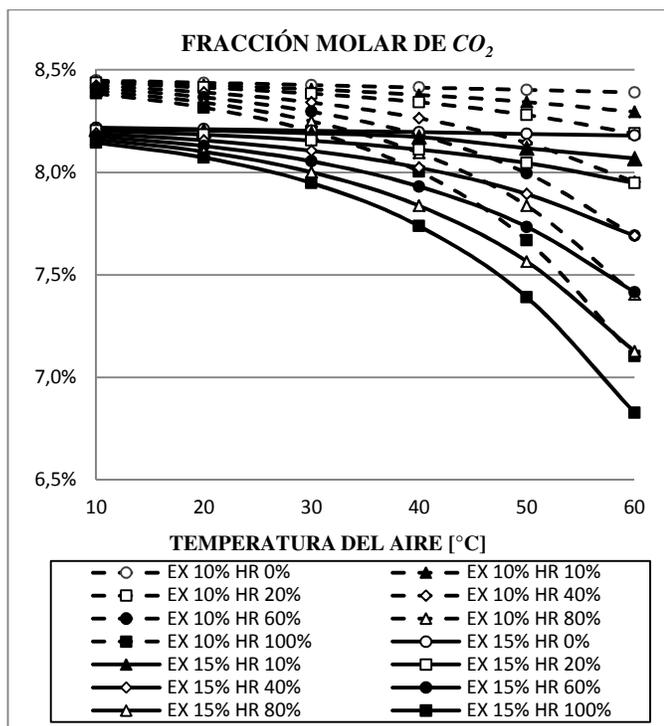


Figura 3. Fracción molar de CO<sub>2</sub> en función de la temperatura y de la humedad relativa del aire

El conocimiento de las variaciones de la fracción molar de CO<sub>2</sub> con la temperatura y la humedad del aire, toma importancia en aplicaciones relacionadas con captura y separación de CO<sub>2</sub>, en las que se han implementado tecnologías para la mitigación del impacto ambiental [14] y también se tiene el valor agregado que puede tener la reducción de impuestos por la emisión CO<sub>2</sub> a la atmósfera en países donde este tipo de tasa ha sido implementada [15]. La efectividad de los sistemas de captura de CO<sub>2</sub> en productos de

combustión, como los basados en absorción con aminas, tiene una estricta dependencia de las condiciones de los gases de combustión a tratar, ya que concentraciones más elevadas de CO<sub>2</sub> facilitan el proceso de captura. Tecnologías como la recirculación de gases de combustión están siendo investigadas para propender por un incremento de la concentración de CO<sub>2</sub>, de manera que un conocimiento detallado del fenómeno de combustión puede conllevar a un mejor desempeño de procesos destinados a la reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera.

En la Fig. 4 puede observarse que para humedades relativas similares, el contenido de agua en los productos de combustión es siempre mayor para un exceso de aire de 10% en comparación con un exceso de aire del 15%. También puede notarse que a mayor temperatura del aire y humedad relativa, la fracción molar de H<sub>2</sub>O se incrementa para cualquiera de los dos excesos de aire. Para una temperatura de aire constante, la influencia de la humedad relativa y del exceso de aire en el incremento de la concentración de H<sub>2</sub>O en los gases de combustión es mayor a medida que la temperatura del aire se incrementa.

Este comportamiento es importante en aplicaciones donde la recuperación de agua a partir de los gases de combustión constituye una de las principales oportunidades de mejoramiento del proceso. Este es el caso de las plataformas petroleras offshore en las que la fuente de agua es el mar, haciéndose necesario un tratamiento del agua salada para ser usada en algunos procesos de la planta. Es en este tipo de aplicaciones donde la recuperación de agua a partir de gases de combustión constituye un potencial interesante de investigación y aplicación [16].

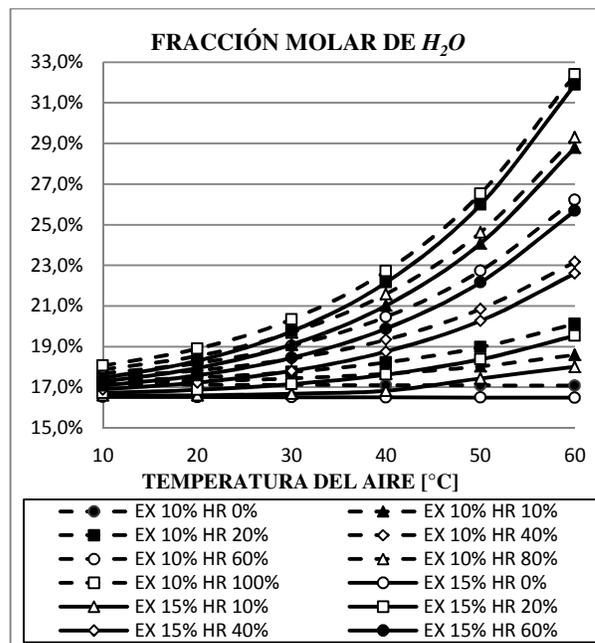


Figura 4. Fracción molar de H<sub>2</sub>O en función de la temperatura y de la humedad relativa del aire

Similar comportamiento al de la Fig. 4 se presenta en la Fig. 5 para el contenido de agua en los productos de combustión expresado en función de la masa de agua por unidad de masa de combustible utilizado.

Procesos industriales en los que son utilizados equipos de combustión son potenciales recuperadores del agua de los gases de combustión, constituyendo una alternativa de reutilización del recurso hídrico. Este tipo de alternativa debe incorporar, por supuesto, un estudio técnico, económico y ambiental detallado para evaluar la sustentabilidad del proceso.

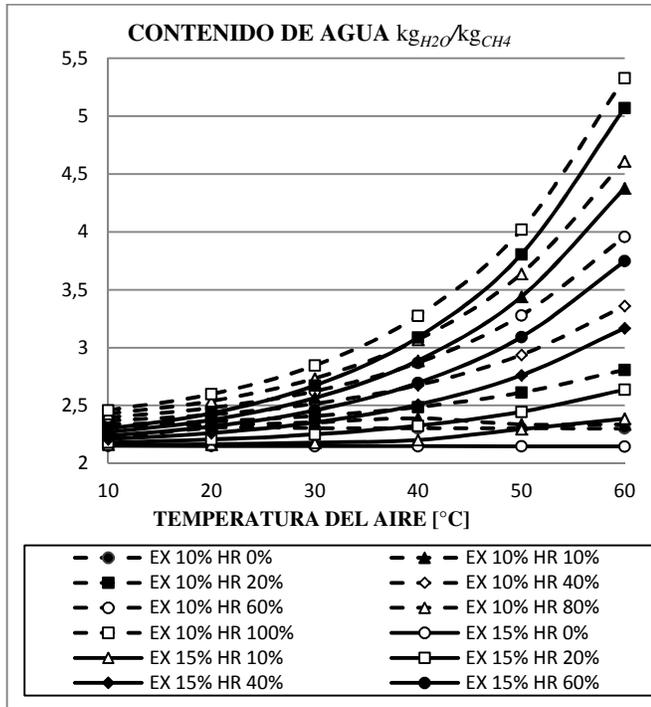


Figura 5. Contenido de agua en los productos de combustión (kg de H<sub>2</sub>O por kg de CH<sub>4</sub>)

## V. CONCLUSIONES

Este estudio permitió demostrar que la humedad relativa y la temperatura del aire pueden llegar a tener un efecto considerable en las propiedades de los gases de combustión del metano, efecto que depende de la aplicación y que es importante evaluar en el caso de algunos procesos que han venido incrementando su popularidad y aplicación como los sistemas de captura de CO<sub>2</sub> y los procesos de recuperación del agua de los gases de combustión para ser reutilizada en el proceso.

El efecto en la reducción de la temperatura de llama y el incremento del contenido de agua es mayor a medida que la humedad relativa y la temperatura del aire son mayores, aspecto que es relevante en procesos en los que se promueve el balance de agua mediante la recuperación de los gases de combustión.

Excepto para el caso ideal de aire seco y humedades relativas inferiores a 10%, el incremento de la temperatura del aire produce una reducción de la concentración de CO y de CO<sub>2</sub>, siendo ésta reducción más considerable a medida que la humedad relativa es más alta. En el caso de las variaciones de concentración de CO<sub>2</sub>, estas son relevantes en los parámetros de operación de los sistemas de absorción con aminas.

Dependiendo de los requerimientos y del tipo de aplicación de conversión de energía mediante procesos de combustión, es importante considerar el efecto del aire húmedo debido a las variaciones que se generan en la temperatura de llama y en la concentración de las especies en los gases de combustión.

## REFERENCIAS

- [1] N. Lior, "Sustainable energy development: The present (2011) situation and possible paths to the future," *Energy*, vol. 43, pp. 174-191, 2012.
- [2] K. Pikoñ, "Environmental impact of combustion," *Applied Energy*, vol. 75, pp. 213-220, 2003.
- [3] R. T. Woodward and R. C. Bishop, "Efficiency, sustainability and global warming," *Ecological Economics*, vol. 14, pp. 101-111, 1995.
- [4] S. Turns, *An Introduction to Combustion: concepts and applications*, Singapore: McGraw-Hill, Inc, 2000.
- [5] CleaverBrooks, "www.cleaver-brooks.com," [Online]. [Accessed 01 10 2012].
- [6] E. L. Keating, *Applied combustion*, New York: Marcel Dekker, Inc, 1993.
- [7] I. Glassman, *Combustion*, Orlando, Florida: Academic Press, 1987.
- [8] K. Kuo, *Principles of combustion*, New York: John Wiley & Sons, Inc, 1986.
- [9] S. K. Som and A. Datta, "Thermodynamic irreversibilities and exergy balance in combustion process," *Progress in energy and combustion science*, vol. 34, pp. 351-376, 2008.
- [10] B. J. McBride and S. Gordon, "CEA NASA: The NASA computer program CEA (Chemical Equilibrium with Applications)," [Online].
- [11] F. F. Huang, *Ingeniería termodinámica: fundamentos y aplicaciones*, México: CECSA S.A., 1994.
- [12] C. Baukal, *Industrial burners handbook*, USA: CRC Press, 2004.
- [13] H. N. Shapiro and M. J. Moran, *Fundamentals of engineering thermodynamics*, 5th ed., New York: John Wiley & Sons, 2006.
- [14] D. Berstad, R. Anantharaman and P. Neksa, "Low-temperature CO<sub>2</sub> capture technologies - Applications and potencial," *International Journal of Refrigeration*, vol. 36, pp. 1403-1416, 2013.

- [15] B. Lin and X. Li, "The effect of carbon tax on per capita CO<sub>2</sub> emissions," *Energy Policy*, vol. 39, pp. 5137-5146, 2011.
- [16] H. M. Kvamsdal, J. Hetland, G. Haugen, H. Svendsen, F. Major, V. Karstad and G. Tjellander, "Maintaining a neutral water balance in a 450 MWe NGCC-CCS power system with post-combustion carbon dioxide capture aimed at offshore operation," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 4, pp. 613-622, 2010.