

ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA RELACIÓN DE EQUIVALENCIA Y EL PRECALENTAMIENTO DEL AIRE EN LA COMPOSICIÓN Y PROPIEDADES DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN EN UN QUEMADOR DE ACPM

RESUMEN

En este artículo se determina teóricamente la composición de los productos y la temperatura de llama adiabática del proceso de combustión en un quemador de ACPM. Para tal efecto se utiliza el programa computacional STANJAN, el cual determina las condiciones de equilibrio de la reacción química. Con base en los resultados obtenidos se establecen consideraciones de tipo ambiental y energético, y se propone una aplicación de la temática a un equipo de calentamiento basándose en los resultados del análisis.

PALABRAS CLAVES: Combustión, equilibrio químico, quemador, precalentamiento.

ABSTRACT

The composition of the combustion products and adiabatic flame temperature in a diesel burner are calculated theoretically using the software STANJAN which determines the equilibrium chemical of the reaction. Environment and energetic considerations are established using the obtained results and are applied to heating equipment.

KEYWORDS: Combustion, chemical equilibrium, burner, preheating.

ALVARO HERNÁN RESTREPO V.

Profesor especial, M.Sc., I.M.
Facultad de Ingeniería Mecánica
U.T.P.
arestrep@utp.edu.co

JUAN ESTEBAN TIBAQUIRÁ G.

Profesor asistente, M.Sc., I.M.
Facultad de Ingeniería Mecánica
U.T.P.
juantiba@utp.edu.co

YAMID ALBERTO CARRANZA S.

Profesor especial, M.Sc., I.M.
Facultad de Tecnología
Escuela de Tecnología Mecánica
U.T.P.
yamidc@utp.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Como parte del proyecto de investigación: “*Diseño, Construcción, Control y Pruebas de un Quemador Experimental de ACPM de alta presión tipo cañón para el Laboratorio de Térmicas*”,¹ en este artículo se realiza el análisis teórico de la combustión del ACPM con el propósito de establecer una base conceptual para comparar con los resultados reales de operación que se obtendrán en una fase posterior, a partir del registro experimental en un equipo de análisis de gases de combustión.

Como objetivo general se pretende determinar la influencia de la relación de equivalencia y la temperatura del aire para la combustión, en la composición de los productos y la temperatura de llama adiabática de la combustión del ACPM, al ser considerado como dodecano $C_{12}H_{26}$.

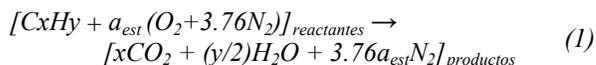
Los resultados de las especies de combustión y la temperatura de llama adiabática son obtenidos utilizando el programa computacional STANJAN¹. A partir de estos, se establecen observaciones relacionadas con el desempeño ambiental y energético del proceso de combustión, y se implementan en una aplicación real.

2. FUNDAMENTOS DE COMBUSTIÓN [2]

La importancia de la combustión radica en el aprovechamiento de la energía química de un combustible para generar energía en forma de calor que puede ser utilizada en diversas aplicaciones prácticas.

La combustión de un hidrocarburo genera altas temperaturas (calor) y productos cuya composición varía de acuerdo a diversas condiciones entre las cuales se pueden mencionar: tipo de combustible, cantidad de aire, temperatura de los reactantes, recirculación de gases, entre otras.

La combustión ideal de un hidrocarburo C_xH_y con aire² se expresa como:



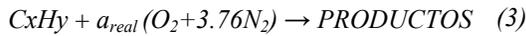
Mediante un balance de átomos se determina el valor de a_{est} , valor que representa la cantidad molar de aire requerido para que se realice la oxidación completa del hidrocarburo, manteniéndose el nitrógeno como elemento inerte:

$$a_{est} = x + y/4 \quad (2)$$

¹ STANJAN *Chemical Equilibrium Solver*. Stanford University. Versión 3.96: gratuita y disponible en la web.
Fecha de recepción: 29 Marzo de 2004
Fecha de aceptación: 16 Abril de 2004

² Se considera que el aire tiene una composición de 21% de O_2 y 79% de N_2 , en volumen.

Debido a que los procesos reales de combustión se realizan generalmente en condiciones diferentes a las estequiométricas, se generan otras especies adicionales en los productos, unas denominadas mayores y otras menores, de acuerdo a la cantidad, por consiguiente:



Se define la *relación de equivalencia*, Φ , como:

$$\phi = \frac{(A/C)_{est}}{(A/C)_{real}} \quad (4)$$

Donde (A/C) es la relación Aire-Combustible (estequiométrica y real). La relación Aire-Combustible es una relación de masas, la cual se establece mediante las siguientes expresiones para las condiciones estequiométrica y real:

$$(A/C)_{est} = \left(\frac{m_{aire}}{m_{comb}} \right) = \frac{4.76a_{est} M_{aire}}{1 M_{comb}} \quad (5)$$

$$(A/C)_{real} = \left(\frac{m_{aire}}{m_{comb}} \right) = \frac{4.76a_{real} M_{aire}}{1 M_{comb}}$$

Donde M es el peso molecular. A partir de las ecuaciones (5) la relación de equivalencia Φ puede expresarse como:

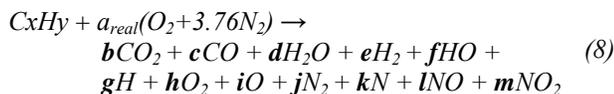
$$\phi = \frac{a_{est}}{a_{real}} \quad (6)$$

El exceso de aire, es decir, la cantidad de aire excedente que se ingresa al proceso de combustión con el fin que en una combustión real se pueda alcanzar una mejor oxidación del combustible, está relacionado con la relación de equivalencia mediante:

$$(\%)Exceso.Aire = \frac{(1-\phi)}{\phi} * 100\% \quad (7)$$

3. DISOCIACIÓN Y EQUILIBRIO QUÍMICO

Para el presente análisis se consideran doce especies en los productos de combustión:



La variedad de compuestos en los productos para una combustión real se debe a las altas temperaturas generadas, lo que ocasiona la *disociación* de las especies, fenómeno en el cual una especie genera otras especies, y éstas últimas, tienden a formar la especie inicial, convirtiéndose en un proceso repetitivo hasta alcanzar³ el equilibrio químico.

La condición de equilibrio químico es la base para la determinación de la composición de las especies en los productos de combustión. El equilibrio químico está en dependencia del principio de incremento de entropía para un sistema reactivo. Para el caso de un sistema adiabático:

$$dS \geq 0$$

La anterior expresión indica que una reacción química en una cámara adiabática sucede en dirección de la entropía creciente hasta alcanzar un valor máximo. Para propósitos de combustión resulta más útil el empleo de la función de Gibbs, la cual relaciona la entalpía H , la temperatura T y la entropía del sistema S :

$$G = H - TS$$

Por lo tanto, se establece que para una temperatura y presión especificadas la reacción de combustión seguirá en la dirección de la función de Gibbs decreciente hasta alcanzar un valor de cero, punto en el cual se establece el equilibrio químico:

$$dG \leq 0$$

De acuerdo al método de obtención, existen dos posibilidades para el cálculo de las composiciones de equilibrio (b, c, d, \dots), ecuación (8):

- Método de las constantes de equilibrio de las ecuaciones de disociación que gobiernan la combustión.
- Método de la minimización de la energía libre de Gibbs.

4. TEMPERATURA DE COMBUSTIÓN

La temperatura de la combustión es afectada por el estado de los reactantes, la cantidad de reactantes y el grado en el que se completa la reacción. Es en este último aspecto donde la disociación tiene influencia en la temperatura generada durante la combustión. Cuando el proceso de combustión se realiza de manera que no se pierde calor hacia los alrededores, la entalpía de los reactantes es igual a la entalpía de los productos, por consiguiente, la temperatura de los productos se denomina *temperatura de llama adiabática*, y su valor es máximo debido a que toda la energía química liberada por el combustible se usa internamente para elevar la temperatura de los productos.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Las figuras a continuación presentan los resultados obtenidos a partir del programa STANJAN. En las figuras 1, 2, y 3, se establece la composición de los productos de combustión (en términos de la fracción molar) y la temperatura de llama adiabática, ambas como función de la

direcciones a la misma relación, punto en el cual se supone el equilibrio. Por esta razón se emplea la notación: $C \leftrightarrow A + B$.

³ La reacción química no se detiene, ésta continuará sucediendo en ambas

relación de equivalencia Φ , y calculadas para una temperatura de los reactantes de 298.15 K.

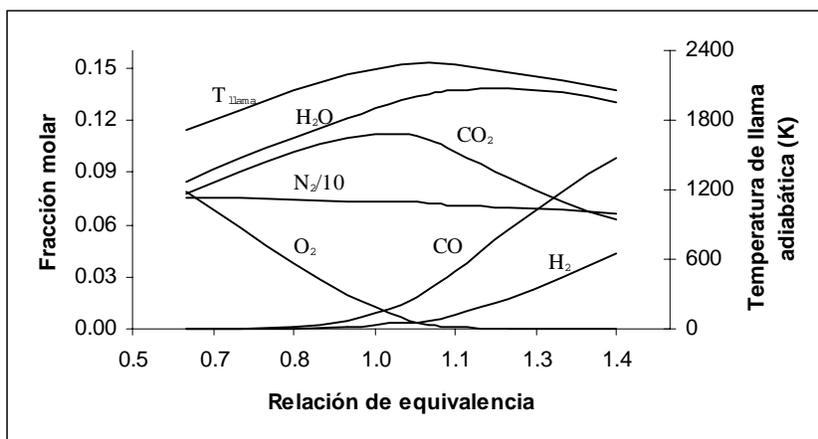


Figura 1. Temperaturas de llama adiabática y composición de equilibrio para el $C_{12}H_{26}$ con aire a 298.15 K. Especies mayores.

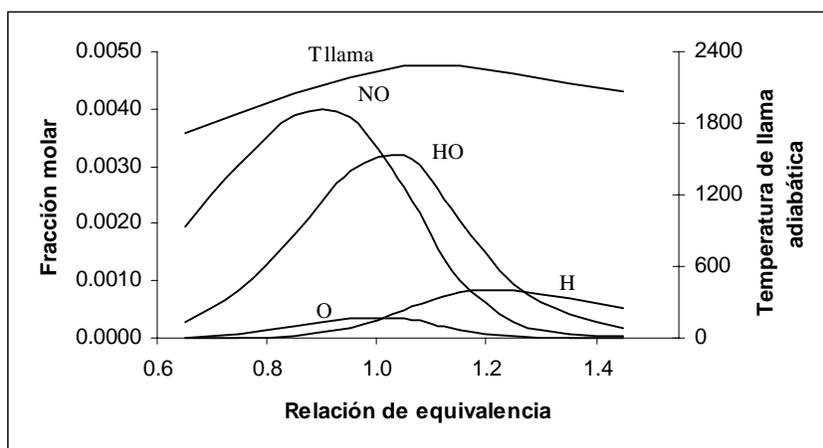


Figura 2. Temperaturas de llama adiabática y composición de equilibrio para el $C_{12}H_{26}$ con aire a 298.15 K. Especies menores

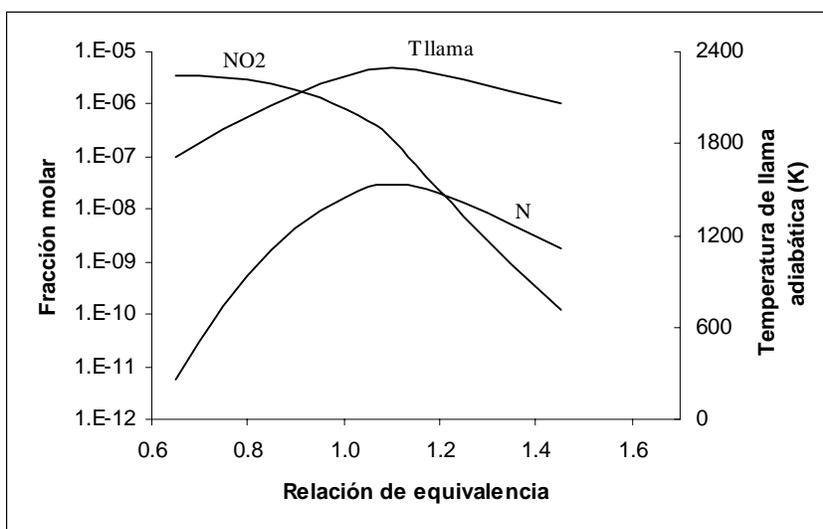


Figura 3. Temperaturas de llama adiabática y composición de equilibrio para el $C_{12}H_{26}$ con aire a 298.15 K. Especies menores: NO_2 y N

En la figura No. 1 se aprecia la variación de las especies mayores: H_2O , CO_2 , N_2 , O_2 , CO y H_2 . Puede notarse claramente, que proporcionar exceso de aire en un proceso de combustión disminuye la producción de CO_2 , y en mayor grado el CO , lo cual es favorable desde el punto de vista ambiental, pero gráficamente también se observa que la temperatura de llama adiabática disminuye, lo que constituye una reducción en la eficiencia del proceso de combustión.

En las figuras 2 y 3 se muestran las variaciones de las especies menores: NO , HO , H , O , NO_2 y N . Ambientalmente se procura por tener una reducción en los óxidos de nitrógeno NO_x . Las emisiones de NO_x tienen efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente, estas juegan un papel importante en:

- . La lluvia ácida.
- . Formación de niveles peligrosos de ozono (O_3) en la superficie terrestre.
- . Formación de smog en la atmósfera.

Por lo tanto, se observa que un rango de la relación de equivalencia común en quemadores, como lo es 0.9-0.8 (exceso de aire de 15 a 25%), produce la mayor cantidad de NO_2 y NO .

Cabe resaltar, que debido al fenómeno de disociación, el incremento en las composiciones de NO_x es función de las altas temperaturas de llama. Por lo tanto, se ha venido aplicando la estrategia tecnológica y ambiental de recircular parte de los gases de combustión en procura de la reducción de la contaminación a costa de la disminución de las temperaturas de llama.

Seguidamente, se presentan los resultados de las especies CO_2 , CO , NO_2 y NO , en las figuras 4, 5, 6 y 7, para tres temperaturas del aire: 298.15 K, 333.15 K y 393.15 K, con el fin de analizar el efecto del precalentamiento.

La temperatura del combustible se mantuvo constante a 298.15 K, y para cada temperatura de precalentamiento de aire se varió la relación de equivalencia, gráficamente se presentan los rangos en los cuales las variaciones en la composición son más representativas.

En relación con la figura No.4, se establece que la combustión con relaciones de equivalencia inferiores a 1.0, mezclas ricas, conlleva a una menor generación de CO_2 . También se observa que el efecto de precalentar el aire de combustión contribuye a disminuir la formación de este contaminante.

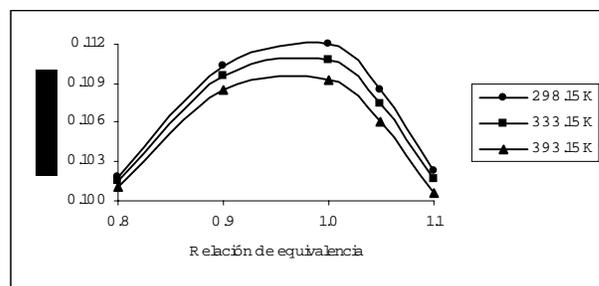


Figura 4. Variación de la composición de CO_2 a diferentes temperaturas de precalentamiento

La figura No. 5, muestra que al aumentar el exceso de aire en la combustión se favorecerá la reducción del CO , lo cual, desde el punto de vista ambiental, resulta beneficioso. Se observa que para una relación de equivalencia de 1.0, el incremento en la temperatura del aire desde 298.15 K a 393.15 K, genera un aumento en la composición del CO de aproximadamente 0.003 (~3000 ppm), y para el mismo incremento de temperatura, una relación de equivalencia de 0.9 produce un incremento en la composición cercano a 0.002.

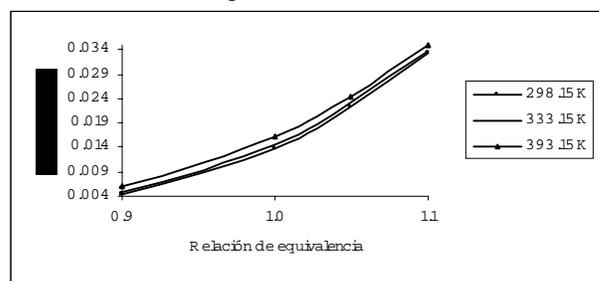


Figura 5. Variación de la composición de CO a diferentes temperaturas de precalentamiento

La figura No 6 muestra la evolución del NO_2 en función de la relación de equivalencia. En esta gráfica se puede observar que cuando la relación de equivalencia toma valores menores a la unidad, la fracción molar de NO_2 crece rápidamente, lo que aumenta los efectos contaminantes. También se puede observar que la variación de la fracción molar en función de la temperatura, para valores de relaciones de equivalencia mayores a 0.9, resultan ser insignificantes.

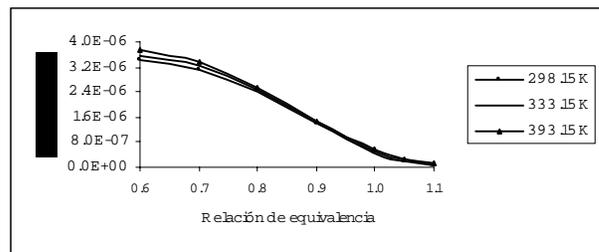


Figura 6. Variación de la composición de NO_2 a diferentes temperaturas de precalentamiento

De la figura No 7 se puede deducir que la fracción molar de NO es directamente proporcional a la temperatura de

precalentamiento del aire y alcanza su valor máximo en un rango de relación de equivalencia entre 0.8 y 0.9, lo que normalmente ocurre en una combustión real.

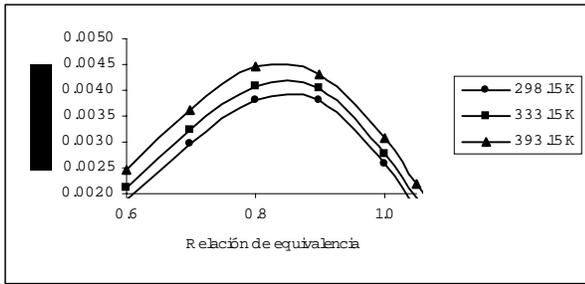


Figura 7. Variación de la composición de NO a diferentes temperaturas de precalentamiento

El comportamiento térmico del proceso de combustión se analiza con la figura No 8, en la cual se presenta la variación de la temperatura de llama adiabática en función de la relación de equivalencia y la temperatura del aire de combustión. Es interesante anotar que la máxima temperatura de llama adiabática se presenta a una relación de equivalencia de 1.05, esto es debido al hecho que cuando en el sistema la combustión es ligeramente rica, el calor específico de los productos se reduce, y por lo tanto, la temperatura de llama adiabática aumenta.[3]

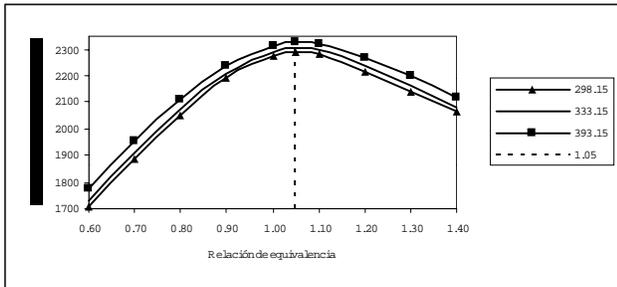


Figura 8. Variación de la temperatura de llama adiabática.

6. APLICACIÓN

A continuación se desarrolla una aplicación de los temas expuestos anteriormente, con el propósito de mostrar los efectos que tiene el precalentamiento del aire en los consumos del combustible, y por lo tanto, en el ahorro del mismo.

La figura 9 representa el diagrama esquemático de un equipo para calentamiento, el cual opera con un quemador de ACPM. El aire es precalentado mediante un recuperador antes de entrar al proceso de combustión.

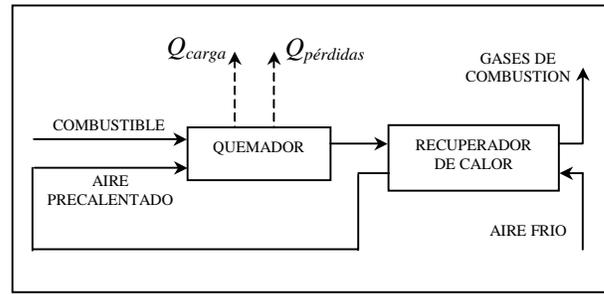


Figura 9. Esquema que ilustra el precalentamiento de aire en una aplicación de calentamiento

Para estimar el calor liberado en la combustión se aplica la primera ley de la termodinámica para estado estacionario⁴:

$$\dot{Q} + \dot{m}_{aire} h_{aire} + \dot{m}_{comb} h_{comb} = \dot{m}_{prod} h_{prod} \tag{9}$$

Donde:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{carga} + \dot{Q}_{pérdidas} \tag{10}$$

y,

$$\dot{m}_{prod} = \dot{m}_{aire} + \dot{m}_{comb} \tag{11}$$

Combinando las ecuaciones (9) y (11) se obtiene:

$$\dot{Q} = (\dot{m}_{aire} + \dot{m}_{comb}) h_{prod} - \dot{m}_{aire} h_{aire} - \dot{m}_{comb} h_{comb} \tag{12}$$

La ecuación 12 se puede reescribir como:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{comb} \left[\left(\frac{\dot{m}_{aire}}{\dot{m}_{comb}} + 1 \right) h_{prod} - \frac{\dot{m}_{aire}}{\dot{m}_{comb}} h_{aire} - h_{comb} \right] \tag{13}$$

Al definir la eficiencia del proceso como el cociente entre el calor suplido a la carga más el calor de pérdidas y el Poder Calorífico Inferior⁴ del combustible, se tiene:

$$\eta = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_c PCI} = \frac{\left[\left(\left(\frac{A}{C} \right)_{real} + 1 \right) h_{prod} \right] - \left[\left(\frac{A}{C} \right)_{real} h_{aire} + h_{comb} \right]}{PCI} \tag{14}$$

En el numerador de la ecuación (14), el paréntesis derecho representa la entalpía de los reactantes por unidad de masa de combustible. Su valor es determinado

⁴ El Poder Calorífico Inferior del combustible se determina con STANJAN determinando la diferencia de entalpía entre los productos y los reactantes, ambos a 298.15 K.

mediante de la entalpía de los reactantes calculada con STANJAN en kJ/kg_{mezcla} , y relacionando el flujo total de masa con la relación Aire-Combustible, la cual es conocida al asumir un valor de la relación de equivalencia. Para los reactantes se varía la temperatura del aire.

El paréntesis izquierdo, el cual hace relación a la entalpía de los productos, se obtiene a partir de la entalpía en kJ/kg_{mezcla} de los productos calculada con STANJAN, asumiendo una temperatura de los gases de combustión.

Los resultados de la eficiencia y el ahorro de combustible son presentados en la figura No 10. El porcentaje de ahorro se determina en relación con el consumo de combustible cuando el aire está a 298.15 K.

Resulta claro que el incremento en la eficiencia permite lograr una reducción en los costos de combustible, lo cual plantea evaluar la viabilidad técnica, ambiental y económica, de implantar equipos de recuperación de calor en aplicaciones de calentamiento a partir de procesos de combustión.

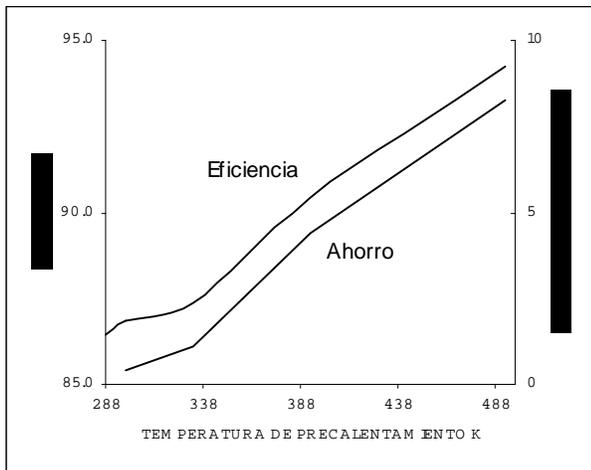


Figura 10. Esquema que ilustra la variación de la eficiencia y el ahorro de combustible con el precalentamiento de aire.

7. CONCLUSIONES

La caracterización teórica de la combustión del dodecano, $C_{12}H_{26}$, permite establecer criterios bien fundamentados acerca de las tendencias ambientales, técnicas y económicas en la operación de quemadores de ACPM.

En términos ambientales, el precalentamiento de aire tiene efectos nocivos en la contaminación debido al aumento del CO , NO_2 y NO . Lo anterior es consecuencia del incremento de la disociación cuando las temperaturas de llama son elevadas.

El precalentamiento ocasiona la elevación de la temperatura de llama adiabática lo cual favorece la energía térmica liberada por el proceso, lo que redundará en el mejoramiento de la eficiencia y la reducción en el consumo de combustible.

8. BIBLIOGRAFÍA

¹ Tibaquirá J., Carmona M., Acosta A., *Diseño y construcción de un quemador experimental de ACPM de alta presión tipo cañón*. SCIENTIA ET TECHNICA. Octubre de 2003 No. 22. Páginas 69 a 74 .

² TURNS, Stephen R. *An introduction to Combustion . Concepts and Applications*. International edition. Singapore. McGraw Hill. 1996

³ KUO, Kenneth. *Principles of Combustion*. United States of America. John Wiley & Sons, Inc. 1986.

⁴ CENGEL, Yunus A. *Termodinámica*, Cuarta edición. México. McGraw Hill. 2002.