

CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ESTEQUIOMÉTRICA DE LA COMBUSTIÓN DE LA CASCARILLA DE ARROZ

RESUMEN

En este artículo se describe la caracterización teórica de la combustión de la cascarilla de arroz desde el punto de vista energético y medioambiental. Para el primero, se utilizó la primera ley de la termodinámica para calcular la temperatura adiabática de llama, y para el otro, la estequiometría y la teoría de equilibrio químico para conocer la composición molar de los productos de la combustión.

PALABRAS CLAVES: Caracterización química, Combustión, Composición molar, Temperatura adiabática de llama, Modelo matemático.

ABSTRACT

This article describes the theoretical characterization of rice husk combustion from energetic and environmental perspective. For first one, it use first law of thermodynamic to find the adiabatic temperature of flame, and for another one, it use stochiometry and theory of chemical equilibrium to calculate molar composition of combustion products.

KEYWORDS: *Characterization, Combustion, Molar composition, Adiabatic temperature of flame, Mathematic model.*

1. INTRODUCCIÓN

La caracterización de la cascarilla de arroz ha sido el primer paso en un proceso que pretende mejorar la tecnología de combustión de la misma con el fin de obtener un proceso continuo, de temperatura sostenida, térmicamente eficiente y de bajo impacto ambiental. Este proyecto se desarrolla bajo el programa Jóvenes Investigadores de Colciencias y está dirigido a solucionar dos problemas que aquejan al sector arrocero, uno de los más importantes polos de desarrollo para el Departamento del Tolima. Por un lado, se encuentra la disposición final de la cascarilla de arroz y, por el otro, el alto costo de la generación de calor para el secado del mismo.

Aunque algunos molinos ya están empleando esta fuente de energía, lo hacen en forma empírica y sin ningún tipo de control ambiental o de proceso. Por medio de este trabajo se podrá conocer la incidencia de las variables asociadas a la combustión —relación de equivalencia, presión y temperatura— en la eficiencia de dicho proceso. Estudios previos se habían acercado de manera tangencial al problema de la combustión de los cascarilla de arroz, ya que sólo habían tenido en cuenta el caso estequiométrico en el estudio energético y no profundizaron teóricamente en la composición de los gases de combustión.

Este estudio se basó en los modelos matemáticos que brinda la teoría de equilibrio químico, de disociación, de estequiometría y de reacción química aplicados a la

JAVIER VARÓN CAMARGO

Ingeniero Mecánico
Joven Investigador
Grupo de Trabajo Área de Termofluidos
Corporación Universitaria de Ibagué
jfvaron@nevado.cui.edu.co

ALVARO HERNÁN RESTREPO V.

Profesor Especial, MSc, IM.
Facultad de Ingeniería Mecánica
U.T.P.
arestrep@utp.edu.co

combustión. Para lo cual se tuvieron en cuenta dos variables fundamentales: la temperatura adiabática de

llama, lo que da una idea aproximada de la eficiencia energética que se puede alcanzar en el proceso, y la composición de los productos de la combustión que indica el impacto ambiental que podría generar. Como primera medida, se realizaron los cálculos de la combustión sin tener en cuenta la disociación y, luego, sólo se tuvieron en cuenta los niveles de relación de equivalencia que tuvieron una temperatura por encima de 1500 K para observar el comportamiento de la cascarilla bajo el efecto de este fenómeno.

2. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA CASCARILLA DE ARROZ

La cascarilla de arroz que se produce en el Tolima presenta la siguiente composición química obtenida de un estudio hecho por Unión de Arroceros S.A. [5]:

COMPONENTE	%
Carbono	39.1
Hidrógeno	5.2
Nitrógeno	0.25
Oxígeno	37.2
Azufres	0.43
Cenizas (Sílice 94.5%)	17.8
Humedad (H ₂ O)	8.9

Tabla 1. Composición química de la cascarilla de arroz producida en el Departamento del Tolima.

Como se puede ver, existen compuestos en una proporción ínfima como el nitrógeno y los sulfuros, y otros que son inertes en la reacción química de la combustión como las cenizas. Así que sólo se tendrán en cuenta el carbono, el hidrogeno y el oxígeno para obtener la fórmula química equivalente [3] de la cascarilla de arroz, cuyos porcentajes se dividen por el peso molecular de cada uno para hallar su cantidad molar, las cuales aparecen en la Tabla 2.

COMPONENTE	MOL
Carbono	3.2553
Hidrógeno	5.1592
Oxígeno	2.3251

Tabla 2. Composición molar de la cascarilla de arroz producida en el Departamento del Tolima.

Luego, se dividen estas cantidades por la menor de ellas, en este caso el oxígeno, para obtener la relación atómica que guardan los elementos entre sí, la cual reducida a cantidades enteras por razones estequiométricas llega a ser

$$C : H : O = 1 : 2 : 1$$

Estos valores corresponden al carbono equivalente, al hidrógeno equivalente y al oxígeno equivalente. Sin embargo, en la estequiometría de la combustión el oxígeno equivalente debe ser sustraído del hidrógeno equivalente, y el hidrógeno restante se denomina hidrógeno neto [1]. Entonces, el carbono equivalente y el hidrógeno neto es la cantidad de carbono e hidrógeno disponible para la combustión. Por lo tanto, la relación atómica quedaría

$$C : H : O = 1 : 1 : 0$$

y la fórmula empírica equivalente de de la cascarilla de arroz será C_1H_1 , aunque por comodidad se referirá en este artículo simplemente como CH .

No obstante, se debe hacer claridad en el hecho de que ésta no es la fórmula molecular de la cascarilla de arroz sino sólo un estimativo teórico de la misma. Se recurre a este equivalente ya que no se dispone del peso molecular de la cascarilla de arroz que permitiría calcular la fórmula molecular. Esto debido a que la cascarilla de arroz no es propiamente un compuesto químico sino un aglomerado de muchos compuestos. A partir de esta fórmula se puede hacer un estudio cuantitativo y cualitativo de la reacción de la combustión de la cascarilla de arroz.

3. ANÁLISIS ESTEQUIOMÉTRICO DE LA COMBUSTIÓN DE LA CASCARILLA DE ARROZ

La estequiometría es una rama de la química que estudia las proporciones de los compuestos involucrados en una reacción química. En este caso se estudia la combustión que es una reacción de oxidación en la cual se libera la energía química almacenada en los enlaces moleculares del combustible. Una reacción de combustión de cualquier combustible del tipo C_xH_y tiene una ecuación química de la forma



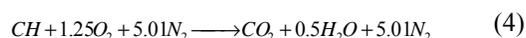
Donde el valor del coeficiente a —cantidad molar estequiométrica de oxígeno— se calcula a partir de la expresión

$$a = x + y/4 \quad (2)$$

Aplicando la fórmula equivalente de la cascarilla de arroz a la ecuación 1 y a la ecuación 2, se obtiene la ecuación química para la combustión de la cascarilla ó



Mediante el balance atómico de cada uno de los elementos presentes en los compuestos de la reacción se encuentran los diferentes coeficientes. Después de realizar los respectivos cálculos y reemplazando estos valores en la ecuación 3, ésta última toma la forma



Ahora, la relación aire combustible —la cantidad de aire necesaria por unidad molar de combustible para obtener una reacción química estequiométrica— se define por

$$(A/C)_{\text{esteq}} = \left(\frac{m_{\text{aire}}}{m_{\text{comb}}} \right) = \frac{4.76a}{1} \frac{MW_{\text{aire}}}{MW_{\text{comb}}} \quad (5)$$

Reemplazando el valor del peso molecular del aire, de la cascarilla de arroz y la cantidad molar estequiométrica de oxígeno en la ecuación 5 se obtiene

$$\begin{aligned} (A/C)_{esteq} &= \frac{(4.76)(1.25)(28.8491)}{13.0189} & (6) \\ (A/C)_{esteq} &= 13.185 \end{aligned}$$

Lo cual indica que por cada unidad de masa de combustible se deben suministrar un poco más de 13 unidades de masa de aire para lograr una reacción de combustión de tipo estequiométrica.

3.1 Composición molar de equilibrio de los productos de la combustión sin disociación

Hasta ahora se había considerado sólo la condición estequiométrica durante la reacción, pero de aquí en adelante se variará la proporción de aire con respecto al combustible que ingresa a la reacción para con ello abarcar no sólo el caso estequiométrico, sino también la mezcla pobre y rica en combustible. Para cuantificarlas comúnmente se utiliza la relación de equivalencia que es definida como

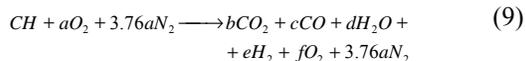
$$\Phi = \frac{(A/C)_{esteq}}{(A/C)} = \frac{(C/A)}{(C/A)_{esteq}} \quad (7)$$

A partir de esta definición se puede concluir que para mezclas ricas $\Phi > 1$, para mezclas pobres $\Phi < 1$ y para mezcla estequiométrica $\Phi = 1$.

Por lo tanto, para incorporar este concepto en el análisis estequiométrico se debe afectar la cantidad molar de oxígeno con la relación de equivalencia, modificando la ecuación 2 de la siguiente forma:

$$a = \frac{x + y/4}{\phi} \quad (8)$$

A partir de esto, se consideran dos casos, uno para mezcla rica, y otro para mezcla pobre y estequiométrica, dependiendo de las condiciones de aporte de aire, es decir si se presenta carencia (primer caso), exceso o aporte exacto de aire (segundo caso). Por lo tanto, la ecuación química de la combustión cambia para abarcar otros componentes que aparecen o desaparecen según el tipo de mezcla que se trate, pero en el caso más general y para la cascarilla de arroz será de la forma



3.1.1. Mezcla pobre y estequiométrica ($\Phi \leq 1$)

En este caso no aparece entre los productos de combustión CO y H₂ debido a la poca cantidad de combustible en relación con la del aire, por lo que los coeficientes *c* y *e* se hacen cero y la ecuación 9 queda de la forma



y las ecuaciones para calcular las fracciones molares de los compuestos de la mezcla de los productos de la combustión se obtienen de dividir las cantidades molares —calculadas por medio del balance atómico para cada uno de los cuatro tipos de elementos involucrados en la reacción de combustión— entre el número total de moles.

$$\begin{aligned} \chi_{CO_2} &= b/N_{Total} \\ \chi_{H_2O} &= d/N_{Total} \\ \chi_{O_2} &= f/N_{Total} \\ \chi_{N_2} &= 3.76a/N_{Total} \\ N_{TOTAL} &= b + d + f + 3.76a \end{aligned} \quad (11 \text{ a-e})$$

Por medio del reemplazo de los valores de *a*, *f* y *N_{Total}* para cada valor de la relación de equivalencia se obtiene la siguiente gráfica.

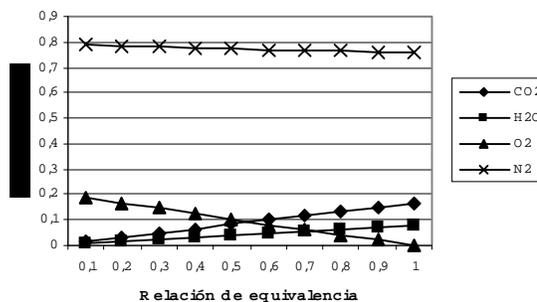
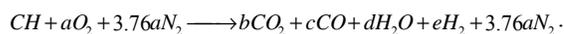


Figura 1. Fracciones molares de los productos de la combustión de la cascarilla de arroz para mezcla pobre y estequiométrica.

En la figura 1 se puede observar el comportamiento de las diversas especies de los productos de combustión para mezcla pobre y estequiométrica. Las especies mayores para este tipo de combustión son N₂, y O₂ que disminuyen a medida que la relación de equivalencia aumenta. En cambio, las especies menores, H₂O y CO₂, van aumentando hasta alcanzar su máximo en la condición estequiométrica. Esto se debe a que a medida que aumenta la relación de equivalencia, la cantidad de aire va disminuyendo mientras que la cantidad de combustible aumenta. Este fenómeno se nota en el hecho de que las especies relacionadas con los elementos que componen el aire (O y N) disminuyen y aquellas relacionadas con el carbono y el hidrógeno (combustible), aumentan.

3.1.2. Mezcla rica ($\Phi > 1$)

Debido a que en esta condición no aparece entre los productos O₂ debido a la poca cantidad de aire en la mezcla, la ecuación 9 toma la forma



Donde las cantidades molares de los compuestos de la mezcla de los productos de la combustión se calculan a partir del balance atómico como se hizo para el anterior tipo de mezcla.

$$\begin{aligned} c &= x - b \\ d &= 2a - b - x \\ e &= -2a + b + x + y/2 \\ N_{TOTAL} &= x + y/2 + 3.76a \end{aligned} \quad (12 \text{ a-d})$$

Además, para completar el sistema de ecuaciones se utiliza el concepto de la constante de equilibrio para la reacción de transformación agua-gas con el fin de encontrar el coeficiente b .

$$K_p = \frac{(P_{CO_2}/P^0) \cdot (P_{H_2}/P^0)}{(P_{CO}/P^0) \cdot (P_{H_2O}/P^0)} = \frac{b \cdot e}{c \cdot d} \quad (13)$$

Reemplazando los valores de e , c y d en la ecuación anterior, ésta toma la siguiente forma:

$$\begin{aligned} b &= \frac{2a(K_p - 1) + x + y/2}{2(K_p - 1)} \\ &- \frac{1}{2(K_p - 1)} \left[(2a(K_p - 1) + x + y/2)^2 - 4K_p(K_p - 1)(2ax - x^2) \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (14)$$

De donde se selecciona la raíz negativa por ser el valor más realista físicamente hablando de la variable b . No obstante, para encontrar este valor se necesita calcular K_p que se puede obtener a partir de la constante de equilibrio de transformación agua-gas. Pero antes de esto se debe hallar el valor del cambio de la función de Gibbs en la reacción de transformación agua-gas mediante la ecuación 15.

$$\Delta G_T^0 = [\bar{g}_{f,CO_2}^0 + \bar{g}_{f,H_2}^0 - \bar{g}_{f,H_2O}^0 - \bar{g}_{f,CO}^0] \quad (15)$$

Donde se toma una temperatura de referencia igual a 2300 K ya que es la temperatura a la que usualmente ocurre la combustión de los combustibles. Reemplazando los valores que suministra la tabla de propiedades termodinámicas de los gases producto de la combustión [4], se obtiene:

$$\begin{aligned} \Delta G_T^0 &= (-396294) + (0) - (-118211) - (-310835) \\ &= 32752 \text{ kJ / kmol} \end{aligned} \quad (16)$$

Reemplazando este valor junto con el de la constante universal de los gases y el de la temperatura de referencia en la ecuación de constante de equilibrio se encuentra que

$$K_p = \exp\left(-\frac{32752}{8.315} \left(\frac{1}{2300}\right)\right) \quad (17)$$

Ahora se procede a calcular el valor de b en función de a , que a su vez depende de la relación de equivalencia. Reemplazando el valor de K_p , x y y en la ecuación 14 se obtiene

$$b = 0.001464129 \left(\sqrt{1.557738 \times 10^5 - 7.9228 \times 10^4 a} + (683a - 625) \right) \quad (18)$$

Como se puede ver, todas las ecuaciones del presente sistema (Ec. 12 a-d y 18) dependen de a que a su vez está en función de la relación de equivalencia y el tipo de combustible debido a la ecuación 4, lo cual hace que todo el sistema quede en función de la relación de equivalencia. Las ecuaciones para calcular las fracciones molares de los compuestos de la mezcla de los productos de la combustión se obtienen de dividir las cantidades molares entre el número total de moles, así:

$$\begin{aligned} \chi_{CO_2} &= b/N_{Total} \\ \chi_{CO} &= c/N_{Total} \\ \chi_{H_2O} &= d/N_{Total} \\ \chi_{H_2} &= e/N_{Total} \\ \chi_{N_2} &= 3.76a/N_{Total} \end{aligned} \quad (19 \text{ a-e})$$

Reemplazando los valores de cada una de las variables obtenidas en la tabulación anterior se obtienen los valores de las fracciones molares de los productos de la combustión de la cascarilla de arroz para mezcla rica que se grafican a continuación.

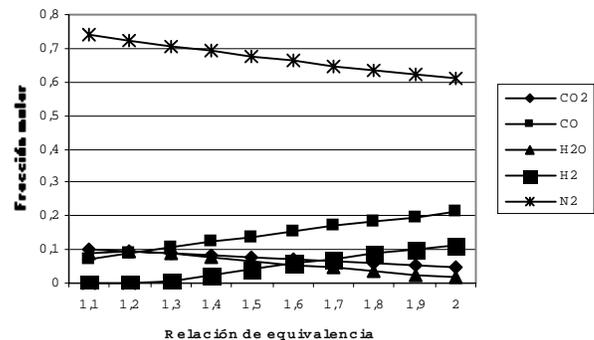


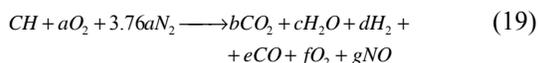
Figura 2. Fracciones molares de los productos de la combustión de la cascarilla de arroz para mezcla rica.

En la figura 2 se observa que las especies mayores para este caso son N_2 y CO . La curva del N_2 continúa el mismo comportamiento descendente que traía desde el área de combustión pobre aunque con una pendiente algo más inclinada. A pesar de que la curva del CO al principio asciende vertiginosamente, luego del valor $\Phi = 1.1$ comienza a hacerlo de forma un poco menos pronunciada. Por otro lado, la curva del gas carbónico inicia en un valor alto pero desciende de forma brusca hasta que llega a $\Phi = 1.1$ donde toma un valor cercano a cero, después de allí permanece poco más o menos constante. La curva del H_2 aparece a partir de $\Phi = 1.5$ cuando asciende con una inclinación constante hasta el final del intervalo de la relación de equivalencia, coincidiendo en este punto con el descenso de la fracción

molar del agua. Esto demuestra que la formación del H₂ le resta al agua átomos de hidrógeno provenientes del combustible. Esto se puede explicar por el hecho de que después de dicho valor de relación de equivalencia el nivel de aire, y por lo tanto de oxígeno, es muy pequeña en relación con el de la cascarilla de arroz.

3.2. Composición molar de equilibrio de los productos de la combustión con disociación

Como se explicó anteriormente, el fenómeno de la disociación puede llegar a tener importancia cuando se trata de procesos de combustión que tienen un nivel de presión y temperatura muy alto. Si se observa la figura 3, algunas de las temperaturas se encuentran en niveles por encima de los 1500 K, que es el nivel en el cual hace su aparición la disociación de los productos de la combustión. Por lo tanto, teniendo en cuenta la disociación durante el proceso de combustión, la ecuación 9 se transforma en:



Para calcular la composición química de los productos de la combustión es necesario, como en los casos anteriores, calcular las cantidades molares de los compuestos, es decir hallar los coeficientes de los términos que aparecen en el lado derecho de la ecuación 19. En ella se observa que la cantidad de especies que componen los productos de la combustión son seis y que junto con el número total de moles de productos conforman las siete incógnitas del modelo matemático para el caso disociado. Por lo tanto, se hace necesario encontrar siete ecuaciones para así conseguir un sistema de ecuaciones que resolver por medio del método Newton-Raphson para la solución de sistemas de ecuaciones no-lineales. Para construir dicho sistema de ecuaciones se disponen: por una parte, de las ecuaciones proporcionadas por el balanceo atómico de los elementos involucrados en la reacción (cuatro), por otra, de las ecuaciones de las constantes de equilibrio de las reacciones de disociación (dos) obtenidas de [1] y, por último, de la cantidad molar de oxígeno que entra al sistema y la cantidad total de moles en los productos de la combustión. Este modelo, aunque se desarrolló con el fin de realizar la caracterización teórica de la gasolina y el gas natural que fue el objetivo inicial del estudio que aparece en [6], su arquitectura le permite ser aplicado a cualquier combustible del tipo C_xH_y. A continuación se muestra el sistema de ecuaciones que describe y conforma el modelo matemático de la composición molar de los productos de la disociación teniendo en cuenta el fenómeno de la disociación.

$$\begin{aligned} 2\eta_{H_2O} - y &= 0 \\ 2\eta_{CO_2} + \eta_{H_2O} + 2\eta_{O_2} + \eta_{CO} + \eta_{NO} - 2a &= 0 \\ 2\eta_{N_2} + \eta_{NO} - 7.52a &= 0 \\ \eta_{CO_2} + \eta_{CO} - x &= 0 \\ K_{p,f} (P/\sum \eta_i)^{-1/2} \eta_{CO_2} - \eta_{CO} \eta_{O_2}^{1/2} &= 0 \\ K_{p,f} \eta_{N_2}^{1/2} \eta_{O_2}^{1/2} - \eta_{NO} &= 0 \\ \eta_{CO_2} + \eta_{H_2O} + \eta_{CO} + \eta_{NO} + \eta_{O_2} + \eta_{N_2} - \sum \eta_i &= 0 \end{aligned} \quad (20 \text{ a-g})$$

En la Tabla 2 se pueden ver los resultados obtenidos a partir de este modelo matemático. Allí se puede observar que al aparecer el fenómeno de la disociación aumentan los niveles de NO y CO, aunque si se comparan con los de los demás productos de la combustión aquellos resultan ser especies menores. No obstante, esto sugiere que se debe ser cuidadoso con la selección del tipo de mezcla y, por ende, de la relación aire-combustible para no obtener temperaturas tan altas que permitan la presencia de este fenómeno.

Φ	χ CO ₂	χ H ₂ O	χ CO	χ NO	χ O ₂	χ N ₂
CON DISOCIACIÓN						
0.9	0.14173	0.072738	0.003746	3.7377e-7	0.022078	0.75971
1	0.14805	0.080151	0.012255	8.1279e-7	0.006127	0.75342
SIN DISOCIACIÓN						
0.9	0.145749	0.072874	0	0	0.020243	0.76113
1	0.161290	0.080645	0	0	0	0.75806

Tabla 3. Fracciones molares de equilibrio de los productos de la combustión de la cascarilla de arroz en función de Φ.

Una vez se tienen las composiciones químicas para cada valor de relación de equivalencia en cada uno de los tipos de mezcla se puede calcular la temperatura adiabática de llama para cada una de ellas.

4. ANÁLISIS TÉRMICO DE LA COMBUSTIÓN DE LA CASCARILLA DE ARROZ

4.1. Poder calorífico

Según el estudio realizado por la compañía Unión de Arroceros S.A. [5], el poder calorífico de la cascarilla de arroz producida en el departamento del Tolima es de 15223.484 kJ/kg. No obstante, para calcular la temperatura adiabática de llama se necesita convertir este valor en función de la cantidad molar debido a que se está trabajando con reacciones químicas basadas en dicha variable. Por lo tanto, haciendo la conversión el poder calorífico resulta ser

$$h_i = 15223.484 \frac{J}{g} \times \frac{[(12.011) + 1(1.0079)]g}{1 \text{ mol de CH}} \quad (21)$$

$$h_i = 15223.484 \frac{J}{g} \times \frac{13.0189 g}{1 \text{ mol de CH}}$$

$$h_i = 198.193 \text{ kJ / mol}$$

4.2. Temperatura adiabática de llama a volumen constante

Utilizando la primera ley de la termodinámica para volumen constante se define la temperatura adiabática de llama para el proceso de combustión que se lleva a cabo en el interior de un quemador de cascarilla de arroz. Dicha incógnita se calcula reemplazando en ella los valores de entalpía y constante calorífica extractadas de las tablas de propiedades termodinámicas de combustibles y gases producto de combustión que aparecen en [2], se obtiene:

$$T_{ad} = \frac{37768.02a + 410295.09b + 120717.104c + 126.738a + 56.205b + 34.148c + 43.874d + 254919.452d + 9260.946e + 10606.714f - 193198}{+ 31.077e + 35.593f} \quad (22)$$

Reemplazando los valores correspondientes al número de moles de cada compuesto obtenida en el análisis estequiométrico se obtiene la siguiente gráfica.

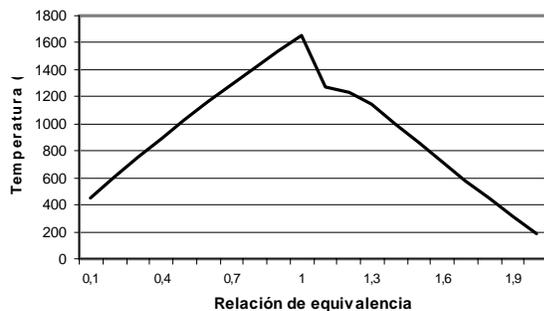


Figura 3. Temperatura adiabática de llama de la cascarilla de arroz en función de Φ .

En esta gráfica se puede observar que solamente los valores de relación de equivalencia ubicados dentro del intervalo que va de 0.9 a 1.1 obtuvieron temperaturas de combustión por encima de los 1500 K. Por lo tanto, a estas mezclas se les debe calcular de nuevo la composición molar de los gases de combustión debido a que las afecta la disociación. Esta composición se puede observar en la Tabla 3. Por otro lado, el valor máximo para está la temperatura adiabática de llama se encuentra en la mezcla estequiométrica de aire y cascarilla de arroz.

3. CONCLUSIONES

Por medio de este estudio se encontró que la cascarilla de arroz tiene un comportamiento idéntico al de cualquier

combustible convencional y, por ende, la afectan los mismos fenómenos y variables que a estos. También la afecta la disociación aunque en menor medida pues no alcanza temperaturas tan elevadas como los combustibles convencionales, lo que, en cierta medida, es favorable debido a la facilidad que esto representa en el control de la presencia de compuestos NO_x en los productos de la combustión. Por otra parte, debido a que la cascarilla contiene muy bajos niveles de azufre también se obtendrán bajos niveles de compuestos SO_x en los productos de la combustión.

Estos dos hechos repercuten en menores controles al proceso de combustión, lo único por lo que se deben preocupar es por regular la mezcla debido a la posible aparición del CO y del NO y por ejercer un cuidadoso control del material particulado que es fácilmente conseguido por medio de filtros y ciclones. La más importante recomendación es permanecer, en la medida de lo posible, en la mezcla estequiométrica aire-combustible para controlar los problemas de emisiones contaminantes a la atmósfera. Por lo que se recomienda realizar la combustión con una mezcla de relación de equivalencia entre 0.9 y 1.1, aunque lo ideal para que no aparezcan especies no deseables como CO y NO es obtener una mezcla con un valor de relación de equivalencia de 1,1.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] GLASSMAN, Irving. Combustion. 3rd. Edition. Academic Press. San Diego, 1996.
- [2] KUO, Kenneth K. Principles of combustion. John Wiley & Son. U.S.A., 1986.
- [3] MARIST COLLEGE. General Chemistry Learning Modules. Determining the formula of a compound from experimental data. <http://department.academic.marist.edu/studentr/genchem/empirfrm/empirfrm.htm>
- [4] TURNS, Stephen. An introduction to combustion. McGraw-Hill Inc. New York, 1996. Pág. 6 – 61 y 516 – 545.
- [5] UNIÓN DE ARROCEROS S.A. Propiedades químicas y físicas de la cascarilla de arroz. Molino San Joaquín. Espinal, 1992.
- [6] VARÓN C, Javier F. Caracterización teórica de la gasolina y el gas natural de acuerdo a su temperatura de llama adiabática y a la composición de los productos de su combustión. Corporación Universitaria de Ibagué. Ibagué, 2002.