

ANÁLISIS Y SOLUCIÓN NUMÉRICA DE LA PROPORCIÓN Y VARIACIÓN DE AIRE SECUNDARIO EN UNA CÁMARA DE COMBUSTIÓN DE BAGAZO

Carlos Quispe Chanampa^{1,*}, Rafael Saavedra García² y Franco Rispoli³

Resumen

En este artículo, se estudiará el comportamiento tridimensional de la combustión del bagazo al interior de la cámara de una hornilla panelera, con el objetivo de mejorar la eficiencia de combustión, reducir costos de producción y asegurar su autosuficiencia energética. El procedimiento consistió en aplicar, en primer lugar, un modelo matemático implementado en MATLAB[®] para simular la combustión en fase sólida del bagazo, el cual forma un lecho sobre una parrilla. Como resultado de esta simulación se obtiene la composición de un combustible gaseoso cuya combustión se simula en el programa comercial ANSYS FLUENT[®], utilizando la geometría de la cámara de combustión de una hornilla panelera ubicada en la sierra de Piura-Perú. Se estudiaron tres casos de relaciones aire primario-secundario de 70-30%, 60-40% y 50-50%, así como el efecto de introducir aire secundario en dos modos: solo por tubos y por tubos así como por la puerta de alimentación del bagazo. De los resultados obtenidos se concluye que con el ingreso de aire secundario solo por tubos y en una proporción del 50% del aire total, se consigue una mayor temperatura promedio de los gases de combustión a la salida de la cámara llegando a superar los 1500 K.

Palabras clave: Azúcar orgánica, combustión de bagazo, combustión en fase sólida y gaseosa.

Abstract

This research will study the three-dimensional behavior of bagasse combustion within the combustion chamber of a production module of organic sugar, with the aim of improve the combustion efficiency, reduce production costs and ensure its energy self-sufficiency. The procedure consisted, firstly, of a simulation of the combustion of bed of solid fuel, bagasse, on a grate, with a mathematical model implemented in MATLAB[®] giving as a result the composition of a gaseous fuel. Secondly, the combustion of the resulting gaseous fuel was simulated with the commercial software ANSYS FLUENT[®] using the geometry of the combustion chamber of a production module of organic sugar located in the highlands of Piura-Peru. Three cases of primary-secondary air ratio were studied: 70-30%, 60-40% and 50-50% as well as the effect of the addition of secondary air in two ways: through tubes and, the second way, through tubes plus through the door for feeding bagasse. From the results, it is concluded that the greatest average temperature of the combustion products at the outlet of the chamber is obtained by the addition of secondary air by tubes in a proportion of 50% of total air admitted; temperatures higher than 1500 K are reached.

Keywords: Jaggery, bagasse combustion, solid and gas phase combustion.

^{1,*}Máster en Sistemas Energéticos y Mantenimiento, Ingeniero Mecánico Eléctrico. Departamento de Ingeniería Mecánico-Eléctrica, Universidad de Piura (UDEP), Av. Ramón Mugica 131, Piura, Perú.

Autor para correspondencia ✉: carlos.quispe@udep.pe

²Doctor en Energía, Ingeniero Mecánico Eléctrico. Departamento de Ingeniería Mecánico-Eléctrica, Universidad de Piura (UDEP), Av. Ramón Mugica 131, Piura, Perú.

³Doctor en Energía, Ingeniero Mecánico. Dipartimento di Meccanica e Aerospaziale, La Sapienza Università di Roma, Via Eudossiana 18, Roma, Italia.

Recibido: 07-10-2014, Aprobado tras revisión: 21-11-2014.

Forma sugerida de citación: Quispe, C.; Saavedra, R.; Rispoli, F. (2014). "Análisis y solución numérica de la proporción y variación de aire secundario en una cámara de combustión de bagazo". INGENIUS. N.º12, (Julio-Diciembre). pp. 35-39. ISSN: 1390-650X.

1. Introducción

En la localidad de Santa Rosa de Chonta, distrito de Montero, provincia de Ayabaca-Piura, Perú, se localiza un módulo para la producción de panela, el cual utiliza como fuente de energía térmica el bagazo, producto de la molienda de la caña de azúcar. Su proceso de combustión se realiza en una cámara diseñada por la Sección de Energía de la Universidad de Piura [1], que tiene como uno de sus puntos prioritarios la mejora de la eficiencia de combustión.

Son diversos los procesos de conversión de biomasa en energía [2], así como los principios que gobiernan las reacciones químicas [3], [4], es por ello por lo que junto con la Sapienza Università di Roma se han desarrollado investigaciones orientadas a hornos de biomasa [5], [6], que definen la metodología actual de trabajo, primero centrándose en modelos de combustión sólida [7], [8], [9] y luego utilizando un programa de simulación comercial basado en la Mecánica de Fluidos Computacional (CFD) [10], [11], [12].

En el presente trabajo, se busca establecer una metodología que simule la combustión del bagazo [13] de manera acorde al caso real, y a partir de ello mejorar la eficiencia energética del proceso estableciendo nuevas condiciones de trabajo.

2. Metodología

Para estudiar el proceso de combustión del bagazo, se dividió el análisis en dos etapas. En primer lugar, se considera la combustión en fase sólida, a partir del aire primario precalentado que ingresa por la parte inferior de una parrilla, que es el lecho donde se deposita el bagazo. Este primer procedimiento brindará la temperatura y la composición de un combustible gaseoso, que se desprende del lecho y que reaccionará con el aire secundario en el interior de la cámara, constituyendo la segunda fase de este proceso. En la Figura 1, se muestra el esquema de combustión.

Lo característico de esta metodología, es que ambas etapas entran en una constante retroalimentación, ya que la combustión en fase sólida requiere de la temperatura de las paredes de la cámara de combustión que inicialmente se supondrá de acuerdo con las pruebas experimentales o criterios teóricos; mientras que en la combustión gaseosa se podrá encontrar su valor verdadero. Con estos resultados se puede corregir el dato de temperatura e interactuar entre las dos etapas hasta que se converja en una solución.

2.1. Combustión en fase sólida

Se considera que el bagazo depositado sobre el lecho tiene forma de un bloque cilíndrico, el cual se divide en un determinado número de celdas definido por el

usuario. A medida que se quema el bagazo, cada una de las celdas va disminuyendo de tamaño, y en el volumen de control definido por su frontera empiezan a coexistir fase sólida y gaseosa. El principio de combustión es asegurar que por unidad de tiempo se llegue a consumir el flujo másico de biomasa que ingresa a la cámara de combustión.

En esta fase destacan los siguientes fenómenos: intercambio de calor por convección entre fases existentes, intercambio de calor por conducción entre celdas contiguas, intercambio de calor por radiación entre celdas contiguas y con las paredes de la cámara, evaporación de humedad, devolatilización, combustión de volátiles y de monóxido de carbono; cada uno representado por una serie de ecuaciones y modelos que se implementaron secuencialmente en MATLAB[®].

2.2. Combustión en fase gaseosa

Al evaluar esta sección, cobra relevancia la geometría de la cámara, la cual se muestra en la Figura 2, siendo necesario utilizar un software de Mecánica de Fluidos Computacional (CFD) como el ANSYS FLUENT[®].

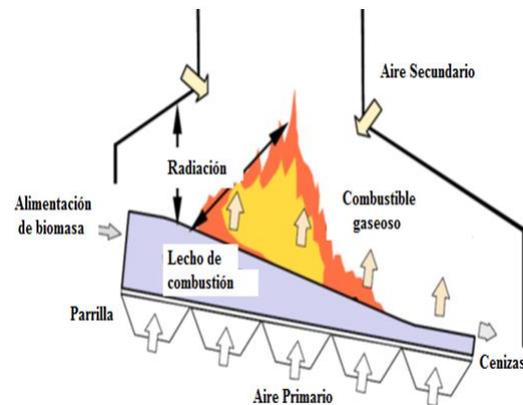


Figura 1. Combustión sólida y gaseosa del bagazo.



Figura 2. Geometría de cámara de combustión.

El primer paso que debe realizar el usuario es la fase de preprocesamiento, donde se deberá mallar la

geometría y establecer indicadores de calidad de malla como el *skewness* y el *aspect ratio*.

A continuación, se define las condiciones de frontera en las entradas y salidas, criterios de convergencia y, principalmente, los modelos matemáticos que se utilizarán por cada volumen finito. Para el presente trabajo, se activará la ecuación de la energía y el modelo de especies de no premezcla. Además, para la turbulencia se seleccionó el modelo $k - \epsilon$ RNG, para considerar la generación no lineal de turbulencia y el modelo de radiación P-1, para priorizar los efectos completos de las paredes calientes sobre el frente de llama.

2.3. Posprocesamiento

En la fase de simulación, se consideraron simulaciones 2D y 3D, a pesar de que las primeras no representan totalmente los efectos de turbulencia, ayudan a definir con qué valor de temperatura de paredes comenzar el estudio 3D, de modo que se ahorra costo computacional.

En los casos 3D, para evitar situaciones de no convergencia con tendencia asintótica, se puede optar por comenzar sin un modelo de radiación esperando una primera convergencia y a partir de estos resultados, activar el modelo P-1 y conseguir una convergencia final.

Los principales resultados que se tomarán en cuenta son los valores promedio de temperatura y fracciones másicas a la salida de la cámara, así como la distribución de las mismas variables al interior de la cámara, para evaluar el mezclado y grado de la reacción de combustión.

3. Resultados y discusión

El primer paso de la simulación consistió en comprobar la metodología propuesta con las condiciones actuales de operación, donde la cámara de combustión opera con un 60% de exceso de aire respecto al estequiométrico, y de este, el 70% corresponde al aire primario y 30% al aire secundario. Los demás valores característicos se encuentran en la Tabla 1.

Con el modelo de fase sólida, se desprende el combustible gaseoso del lecho, cuyas propiedades promedio con las que ingresará a la modelación gaseosa se muestran en la Tabla 2.

Dado que la calidad de la malla influye en la convergencia de la solución, en la Tabla 3 se indican los parámetros principales de la malla de la cámara de combustión, los cuales cumplen con criterios teóricos, como que el *skewness* sea lo más cercano a cero y el *aspect ratio* lo más aproximado a la unidad.

Los resultados de la simulación completa fueron validados con mediciones experimentales realizadas a la hornilla, a partir de un analizador de gases.

Tabla 1. Condiciones de operación actuales del módulo panelero.

| Propiedades | Valor |
|------------------------------------|--------|
| Fracción de masa de bagazo seco | 0.7 |
| Fracción de masa de humedad | 0.3 |
| Flujo másico de bagazo (kg/s) | 0.0917 |
| Humedad relativa del aire (%) | 60 |
| Flujo másico total de aire (kg/s) | 0.502 |
| Temperatura de aire primario (K) | 473 |
| Temperatura de aire secundario (K) | 300 |

Tabla 2. Propiedades del combustible gaseoso proveniente del lecho de combustión.

| Propiedades | Valor |
|-------------------------------------|-------|
| Temperatura de salida del lecho (K) | 0.7 |
| Fracción de masa N ₂ | 0.565 |
| Fracción de masa O ₂ | 0.001 |
| Fracción de masa CO | 0.25 |
| Fracción de masa CO ₂ | 0.034 |
| Fracción de masa H ₂ O | 0.15 |

Tabla 3. Indicadores de malla para geometría en ANSYS FUELT.®

| Propiedades | Valor |
|---|---------|
| Número de elementos | 350 823 |
| Promedio <i>skewness</i> | 0.0139 |
| Desviación estándar <i>skewness</i> | 0.0674 |
| Promedio <i>aspect ratio</i> | 1.071 |
| Desviación estándar <i>aspect ratio</i> | 0.2571 |

El segundo paso de la investigación era variar la proporción entre aire primario y secundario, ya que se notaba que en la parte superior y salida de la cámara había zonas con contenido de monóxido de carbono, que no reaccionaba, aparentemente por no encontrar o mezclarse adecuadamente con el oxígeno. Por esta razón, se simuló con proporciones de 60-40% y 50-50%; donde el aire secundario ingresaba por tubos y la puerta de alimentación del bagazo.

Los resultados de los dos primeros pasos del artículo se muestran en la Tabla 4, destacando el hecho de que con la última proporción analizada se consigue un aumento ligero de temperatura de los gases de combustión a la salida de la cámara, así como una disminución importante de la fracción de masa del monóxido de carbono (CO).

Tabla 4. Análisis de proporción de aire primario y secundario por puerta y tubos.

| Propiedades promedio en la sección de salida | 70-30% | 60-40% | 50-50% |
|--|---------|---------|---------|
| Temperatura (K) | 1412,24 | 1423,27 | 1434,96 |
| Fracción de masa O ₂ | 0,0939 | 0,1049 | 0,1176 |
| Fracción de masa CO | 0,0691 | 0,0502 | 0,0229 |
| Fracción de masa CO ₂ | 0,0906 | 0,0984 | 0,1071 |

Considerando que los resultados mostrados son valores promedio, es necesario analizar los campos de temperatura y de distribución de CO al interior de la cámara. En los tres casos, las formas y regiones características mantienen una tendencia. En las figuras 3 y 4, se muestran las gráficas del mejor caso (50-50%) en el plano medio de la cámara y en la sección de salida, identificando que hay un foco de alta temperatura representado por el color rojo, pero que no es homogéneo, y además, en la mitad inferior de la sección de salida hay una zona de reflujo. En cuanto al CO, se aprecia que se consume pasando la garganta de la cámara; sin embargo, cerca de las paredes laterales de salida, hay una región que no ha podido reaccionar.

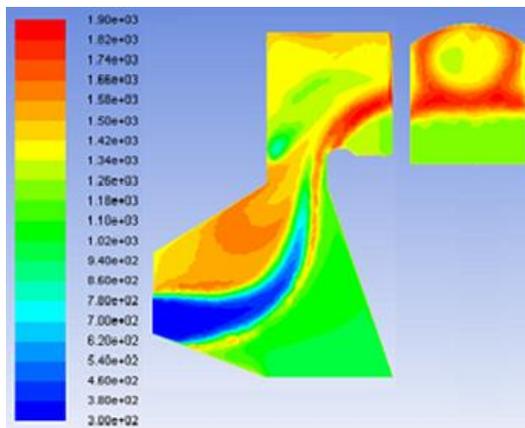


Figura 3. Distribución de temperatura con 50% de aire secundario ingresado por tubos y puerta de alimentación.

La tercera variante consistió en evaluar el efecto de cerrar la puerta de alimentación de bagazo, permitiendo que el aire secundario solo ingrese por los tubos laterales. Para ello, se tomó en cuenta los mismos casos anteriores, cuyos resultados de simulación se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Análisis de proporción de aire primario y secundario solo por tubos.

| Propiedades promedio en la sección de salida | 70-30% | 60-40% | 50-50% |
|--|---------|---------|---------|
| Temperatura (K) | 1505.46 | 1541.23 | 1561.19 |
| Fracción de masa O ₂ | 0,1007 | 0,1097 | 0,1086 |
| Fracción de masa CO | 0,048 | 0,0333 | 0,0053 |
| Fracción de masa CO ₂ | 0,1019 | 0,1079 | 0,1335 |

Se aprecia en cada caso, un aumento importante de temperatura: 93, 117 y 127 grados, respectivamente, superando en todos los 1500 K. Nuevamente, la proporción 50-50% resulta ser la más idónea para la eficiencia de combustión, consiguiendo que la fracción de masa promedio de CO a la salida de la cámara sea menor al 1%.

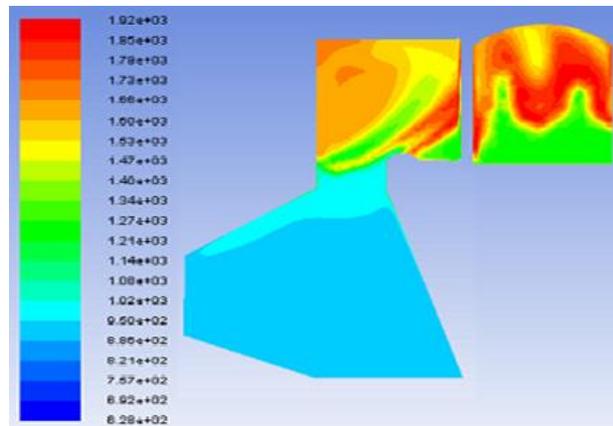


Figura 5. Distribución de temperatura con 50% de aire secundario ingresado solo por tubos.

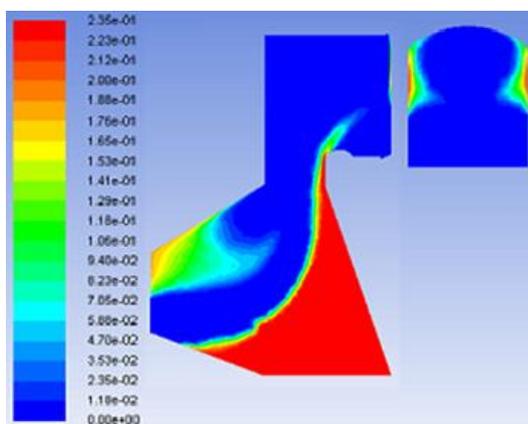


Figura 4. Distribución de CO con 50% de aire secundario ingresado por tubos y puerta de alimentación.

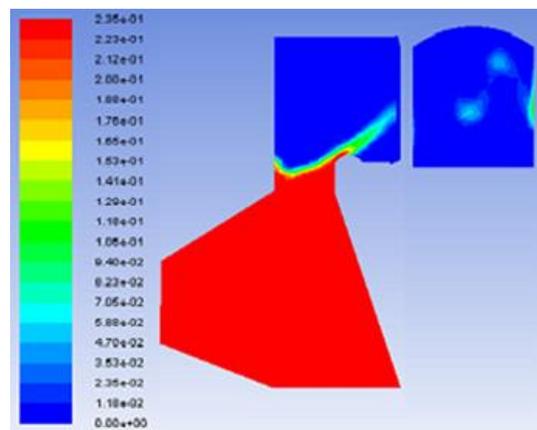


Figura 6. Distribución de CO con 50% de aire secundario ingresado solo por tubos.

Analizando las Figuras 5 y 6, se observa que la parte inferior de la cámara se comporta como una zona de transporte y calentamiento del combustible gaseoso, que reacciona de modo significativo al mezclarse con el aire secundario. En la sección de salida, la zona de reflujo ha disminuido, el color rojo de altas temperaturas ocupa un mayor espacio, y el color azul indica que prácticamente ya no hay monóxido de carbono.

4. Conclusiones

El estudio de combustión de biomasa debe tener dos etapas, primero un modelo de consumo de la fase sólida sobre un lecho, y luego un modelo de combustión para la fase gaseosa del combustible en CFD que considere la geometría de la cámara.

La simulación numérica ahorra costo y tiempo en la fase de diseño de hornillas y cámaras, dado que reduce drásticamente el número de prototipos de construir.

Para combustión, deben efectuarse estudios en 3D, para captar toda la fenomenología de la reacción, sin embargo, sí es de ayuda hacer estudios previos en 2D porque marcan la tendencia de lo que ocurre en un caso real y puede definir valores iniciales en un tiempo mucho menor.

Para la hornilla estudiada, la mejor proporción entre aire primario y secundario es 50-50%, permitiendo que este último solo ingrese por los tubos, es decir, manteniendo cerrada la puerta de alimentación de bagazo el mayor tiempo posible.

Con las condiciones anteriores, se consigue una temperatura promedio de gases de combustión mayor a 1550 K y una fracción de masa de monóxido de carbono menor al 1%.

Los parámetros anteriores, garantizan una combustión más completa y por ende eficiente, ya que se aprovechará mejor el potencial térmico del bagazo para evaporar el agua del jugo de la caña y obtener la panela.

En investigaciones posteriores, se buscará mejorar el mezclado de aire secundario con el combustible gaseoso, haciendo que el aire ingrese tangencialmente por la garganta de la cámara y genere un efecto remolino. Además, se puede empezar a probar variantes en la geometría de la cámara.

Finalmente, este estudio también tiene el propósito de realzar el uso de la biomasa en aplicaciones rurales, a partir de procesos eficientes que supongan la sostenibilidad energética del módulo y un impacto menor sobre el ambiente.

Referencias

- [1] Universidad de Piura. (2008) Diseño innovativo e implementación de un prototipo de cámara de combustión y del sistema de pretratamiento del bagazo para módulos de producción agroindustrial de azúcar orgánico en las comunidades de la sierra de Piura. Proyectos CONCYTEC-PROCOM.
- [2] D. Ranjit, "Thermal gasification or direct combustion? a technical assessment of energy generation in Indonesian sugar factories," 2008, Tesis Magistral. University of Humboldt.
- [3] K. Kuo, *Principles of combustion*, 2nd ed., ser. A Wiley-Interscience publication. Wiley, 2005.
- [4] I. Glassman and R. Yetter, *Combustion*, 4th ed. Elsevier Science, 2008.
- [5] P. Venturini, D. Borello, C. Iossa, D. Lentini, and F. Rispoli, "Modeling of multiphase combustion and deposit formation in a biomass-fed furnace," *Energy*, vol. 35, no. 7, pp. 3008 – 3021, 2010.
- [6] D. Borello, P. Venturini, F. Rispoli, and R. Saavedra, "Prediction of multiphase combustion and ash deposition within a biomass furnace," *Applied Energy*, vol. 101, no. 0, pp. 413 – 422, 2013.
- [7] M. de Souza-Santos, *Solid Fuels Combustion and Gasification: Modeling, Simulation, and Equipment Operations*, ser. Mechanical Engineering. CRC Press, 2004.
- [8] D. Shin and S. Choi, "The combustion of simulated waste particles in a fixed bed," *Combustion and Flame*, vol. 121, pp. 167 – 180, 2000.
- [9] M. Huttunen, L. Kjalman, and J. Saastamoinen, "Analysis of grate firing of wood with numerical flow simulation," *IFRF Electronic Combustion Journal*, no. article number 200401, p. 18, 2004.
- [10] T. Dixon, A. Mann, F. Plaza, and W. Gilfillan, "Development of advanced technology for biomass combustion—cfD as an essential tool," *Fuel*, vol. 84, no. 10, pp. 1303 – 1311, 2005.
- [11] M. Miltner, A. Makaruk, H. Michael, and A. Friedl, "CFD -modelling for the combustion of solid baled biomass," in *Fifth International Conference on CFD in the Process Industries*, CSIRO, Melbourne, Australia, 13-15, Decemeber, 2006 2006.
- [12] R. Scharler and I. Obernberger, "Deriving guidelines for the design of biomass grate furnaces with CFD analysis - a new Multifuel-Low-NOx furnace as example," *Fuel*, pp. 164–178, 2013.
- [13] C. Yin, L. Rossendahl, L. Kaer, S. Clausen, L. Hvid, and T. Hille, "Mathematical modeling and experimental study of biomass combustion in a thermal 108MW grate-fired boiler," *Energy & Fuels*, no. 22, pp. 1380–1390, 2008.