

CFD applications for the Rational Use of Energy from Bagasse in Panela Agroindustry

Carlos Quispe, M.Sc¹, Rafael Saavedra, Dr.¹

¹ Universidad de Piura, Perú, carlos.quispe@udep.pe

Abstract– In recent years, in northern Peru has become more relevant the use of organic waste as a source of thermal energy, as in the case of the residue of sugar cane called bagasse, which together with cane juice as raw material is used for production of organic sugar and ethanol. In the first application, sugarcane agribusiness has developed modules for rural areas. These burners, have a combustion chamber for burning bagasse, producing combustion gases which are responsible for evaporating the water from the cane juice in a wide range of heat exchangers, called pans. CFD simulations improvements in the design of these burners, which involve a considerable increase in energy efficiency were sought. To do this the rate of heat transfer were studied based on a pan in the product gas and air conditions entered the combustion chamber. After validating the CFD methodologies and within the results obtained it is recommended to reduce the height of the gas pipeline to 20-25cm and enter through side tubes a higher proportion of secondary air chamber, 40% of the total, trying to maintain power door closed so that the combustion products to the chamber outlet having a temperature rise of about 100 degrees, resulting in greater thermal power to the evaporation phase.

Keywords— Computational Fluid Dynamics (CFD), bagasse, panela agro-industry.

Digital Object Identifier (DOI): <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2015.1.1.038>

ISBN: 13 978-0-9822896-8-6

ISSN: 2414-6668

13th LACCEI Annual International Conference: “Engineering Education Facing the Grand Challenges, What Are We Doing?” July 29-31, 2015, Santo Domingo, Dominican Republic

Aplicaciones CFD para el Uso Racional de la Energía del Bagazo en la Agroindustria Panelera

Carlos Quispe, M.Sc¹, Rafael Saavedra, Dr.¹

¹Departamento de Ingeniería Mecánico Eléctrica, Universidad de Piura, Perú, carlos.quispe@udep.pe

Resumen– En los últimos años, en el norte del Perú ha cobrado mayor relevancia el uso de residuos orgánicos como fuente de energía térmica, tal es el caso del residuo de la caña de azúcar denominado bagazo, que de manera conjunta con el jugo de la caña como materia prima, se utilizan para producción de azúcar orgánica y etanol.

Dentro de la primera aplicación, se han desarrollado módulos agroindustriales paneleros para zonas rurales. Estas hornillas, cuentan con una cámara de combustión para el quemado del bagazo, produciendo gases de combustión que son los encargados de evaporar el agua del jugo de la caña en una serie de intercambiadores de calor abiertos, denominados pailas.

Con simulaciones CFD se buscaron mejoras en el diseño de estas hornillas, que impliquen un aumento considerable en su eficiencia energética. Para ello se estudió la tasa de transferencia de calor a la base de una paila en el ducto de gases, así como las condiciones del aire ingresado a la cámara de combustión.

Luego de validar las metodologías CFD y dentro de los resultados obtenidos, se recomienda disminuir la altura del ducto de gases a 20-25cm, así como ingresar por tubos laterales una mayor proporción de aire secundario a la cámara, 40% del total, tratando de mantener cerrada la puerta de alimentación, de modo que los productos de combustión a la salida de la cámara tengan un aumento de temperatura de 100 grados aproximadamente, que supone una mayor potencia térmica para la fase de evaporación.

Palabras claves– Mecánica de Fluidos Computacional (CFD), bagazo, agroindustria panelera.

I. INTRODUCCIÓN

La mecánica de fluidos computacional (CFD – Computacional Fluid Dynamics por sus siglas en inglés) es la ciencia que tiene por objetivo predecir el comportamiento del flujo de fluidos, transferencia de masa y calor, reacciones químicas y fenómenos afines, mediante la solución numérica del conjunto de ecuaciones de conservación y transporte. En el presente trabajo, se aplica esta valiosa herramienta en un sector productivo incipiente del departamento de Piura, Perú, como es el caso de la agroindustria panelera. La fuente de energía utilizada es el residuo de la caña de azúcar, recurso biomásico abundante en esta región del país. Por este motivo, desde el 2008, esta área se ha convertido en un tema de interés e investigación continua en la Sección Energía de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Piura [1], hasta llegar a implementar módulos rurales de producción de panela [2]. Luego de su construcción, se buscó mejorar la eficiencia energética, logrando una mayor transferencia de calor en las pailas de evaporación a partir de simulaciones CFD. Considerando a una paila como un intercambiador de calor abierto, se tomó como base los estudios indicados en las referencias [3]-[5] que brindan las pautas y criterios para

modelar la energía que se puede obtener de gases calientes como el caso de productos de combustión de biomasa. Se utilizó el software comercial ANSYS FLUENT que permite considerar diferentes fenómenos a partir de ecuaciones y modelos matemáticos [6], consiguiendo los primeros resultados y mejoras para el diseño de pailas [7] y [8].

Posteriormente, los intereses por aumentar la eficiencia de un módulo panelero se centraron en el proceso de combustión. En esta fase, cobran mayor relevancia los modelos de turbulencia, radiación y de reacciones químicas. La mayoría de software modela el quemado de biomasa líquida y gaseosa principalmente, por lo que no hay procedimientos específicos para residuos sólidos. En esta situación, fue necesario establecer una metodología numérica que modele el comportamiento de la combustión del bagazo, tomando como referencias los estudios CFD [9]-[11]. El procedimiento involucra la combustión en fase sólida y gaseosa, utilizando de manera complementaria MATLAB y ANSYS FLUENT, respectivamente [12]. Luego de validar dicha metodología, se probó algunas variantes en cuanto al aire primario y secundario que ingresaba a la cámara [13], de modo que se pueda conseguir una mayor temperatura de los productos de combustión a la salida de la cámara, que a su vez garantizarían una mayor transferencia de calor a las pailas en la fase de evaporación. Dentro de este panorama, en la presente investigación se pretende mostrar los principales resultados obtenidos a partir de simulación CFD, de modo que los próximos diseños de módulos paneleros garanticen una mayor sostenibilidad energética.

II. METODOLOGÍA

A. Proceso de producción de panela

La panela o azúcar orgánica es un edulcorante con características nutritivas que se obtiene mediante la concentración de los sólidos solubles totales, disueltos en el jugo de la caña de azúcar. Se diferencia de la azúcar refinada por contener además de sacarosa, fructuosa, minerales, grasas, compuestos proteicos y vitaminas.

En la figura 1 se muestra el diagrama de flujo del proceso de producción de panela. La elaboración de azúcar orgánico se inicia con la extracción de la materia prima, seguido de la recepción y acondicionamiento de la caña, para luego continuar con la extracción y acondicionamiento de jugos (molienda, filtración, decantación y almacenamiento de los jugos), así como la obtención de mieles (clarificación, evaporación, concentración y punteo), para terminar con el batido, enfriamiento, tamizado y envasado.

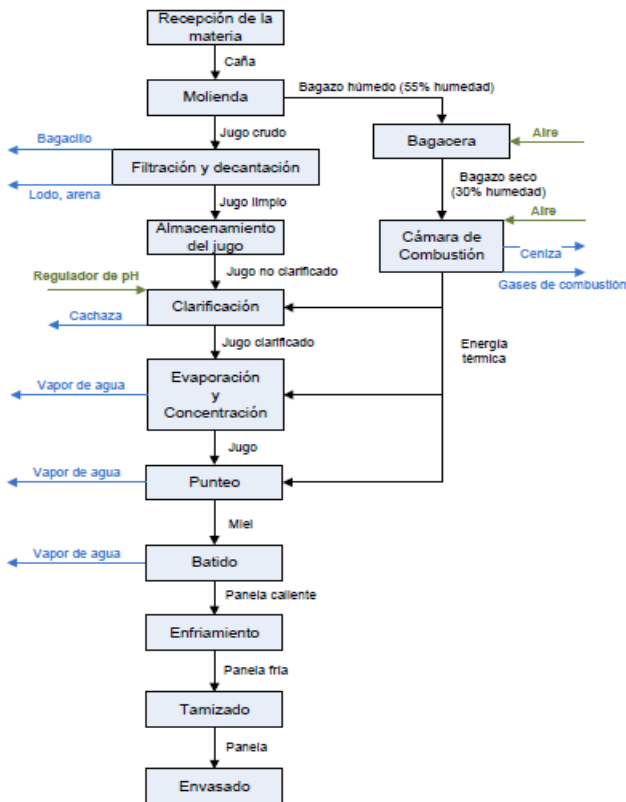


Fig. 1 Diagrama de flujo de proceso de producción de panela

La fuente de energía del proceso es el potencial térmico aprovechado del bagazo, que se manifiesta en la temperatura que puedan alcanzar sus productos de combustión luego de su quemado directo. En la figura 2 se muestra la estructura del módulo de producción de panela construido en la localidad de Santa Rosa de Chonta, sierra de Piura. En esta imagen se puede apreciar el ducto que siguen los gases de combustión desde la salida de la cámara, en el lado izquierdo, hasta llegar a la chimenea en el lado derecho, pasando por la base de varias pailas de evaporación. También se nota que los flujos másicos de gases y jugo de caña se dan a contracorriente sin mezclarse.

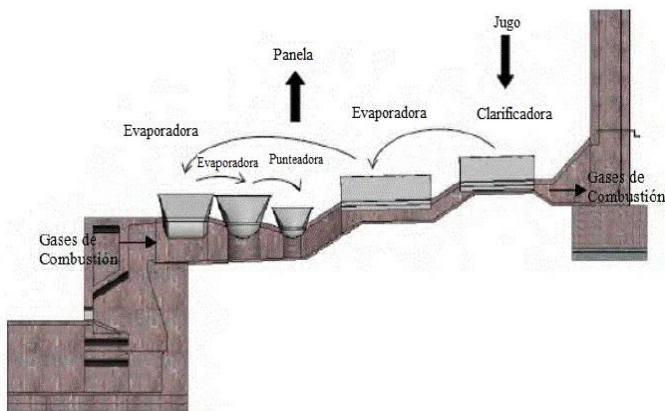


Fig. 2 Módulo de producción de panela en localidad Santa Rosa de Chonta

Con esta descripción, se destaca los dos fenómenos que más influyen en la eficiencia del módulo, y que serán parte del estudio CFD del presente trabajo: transferencia de calor para la evaporación del agua presente en el jugo de la caña y la combustión directa del bagazo al interior de la cámara.

B. Ecuaciones y modelos matemáticos

Para representar los fenómenos propios de la fluidodinámica, se plantea una serie de ecuaciones de transporte. Entre las imprescindibles, se tiene la conservación de la masa (1) y de la cantidad de movimiento (2) en forma vectorial, mayormente conocida como ecuación de Navier Stokes.

Siendo ρ la densidad, \bar{v} el vector velocidad, \bar{g} la gravedad, p la presión y μ la viscosidad del fluido, se tiene:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{v}) = S_m \quad (1)$$

$$\rho \frac{D\bar{v}}{Dt} = \rho \bar{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \bar{v} + \frac{1}{3} \mu \nabla (\nabla \cdot \bar{v}) \quad (2)$$

El término S_m se denomina masa generada y hace referencia a los compuestos que se consumen o se forman en cambios de fase o en reacciones químicas.

Para procesos que involucran transformaciones de energía, se agrega la ecuación de la conservación de esta, planteándola como:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\bar{v} (\rho E + p)) = \nabla \cdot \left(k_{efect} \nabla T - \sum_i h_i \dot{m}_i + (\bar{\tau} \cdot \bar{v}) \right) + S_n \quad (3)$$

Donde E es la energía total, k_{efect} es la conductividad térmica efectiva; h_i y \dot{m}_i la entalpía y flujo másico de un componente 'i', respectivamente; y $\bar{\tau}$ el tensor de esfuerzos viscosos. Los tres primeros términos del segundo miembro de la ecuación (3) representan la energía transferida por conducción, difusión de especies y disipación viscosa, respectivamente. El término S_n incluye el calor de reacción química y otras fuentes de calor que se pueden definir en un software.

Los procesos reales a simular están constituidos por flujos turbulentos, que se caracterizan por campos de velocidad fluctuantes que mezclan cantidades transportadas como impulso, energía, concentración, etc. Para ello se agrega un modelo de turbulencia. Dentro de todos los que se pueden encontrar en la literatura, en la presente investigación se escogió el modelo k-epsilon que implica dos ecuaciones adicionales de transporte para dos variables no físicas como la energía cinética turbulenta (k) y su tasa de disipación (ϵ).

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

Donde los términos α_k y α_ε , representan el inverso del número de Prandtl efectivo para k y ε , respectivamente. Cabe indicar que el resto de parámetros incluidos en las ecuaciones (4) y (5) son constantes que se pueden obtener a partir de [6].

Las variables k y ε , propias de esta metodología se relacionan con la viscosidad a través de dos métodos, por una ecuación no lineal (6) según k-epsilon estándar y por medio de una ecuación diferencial (7) para el modelo k-epsilon RNG. Según el tipo de fenómenos a simular se puede optar por alguna de estas metodologías.

$$\mu = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

$$d \left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon \mu}} \right) = 1.72 \frac{\mu}{\sqrt{\mu^3 - 1 + C_v}} d\mu \quad (7)$$

Del mismo modo, los términos C_μ y C_v representan contantes que se pueden extraer de [6].

Para simular efectos de radiación se opta por el modelo P-1, que está basado en la expansión de la intensidad de radiación I, en una serie ortogonal de armónicos.

Considerando sólo cuatro términos de dicha serie, se obtienen las siguientes expresiones para el flujo de radiación q_r y su ecuación de transporte correspondiente, donde G es la radiación incidente, C es el coeficiente lineal-anisotrópico de función de fase, a el coeficiente de absorción, σ_s el coeficiente de dispersión, n el índice de refracción y E_p la emisión de partículas.

$$q_r = - \frac{1}{3(a + \sigma_s) - C\sigma_s} \nabla G \quad (8)$$

$$-\nabla \cdot q_r = -4\pi \left(an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + E_p \right) + (a + a_p) G \quad (9)$$

Finalmente, en simulaciones que involucren reacciones químicas, especialmente combustión, se selecciona un modelo de no premezcla ya que el combustible y el oxidante ingresan a la cámara de combustión por dos corrientes de flujo distintas.

El proceso termoquímico se reduce a un parámetro denominado fracción de mezcla, que es la fracción de masa local de los elementos quemados y no quemados de combustible en todas las especies:

$$f = \frac{f_i - f_{i,OX}}{f_{i,fuel} - f_{i,OX}} \quad (10)$$

Donde los subíndices ‘ox’ y ‘fuel’ hacen referencia al oxidante y combustible, respectivamente. La fracción de mezcla considera dos componentes: un valor medio \bar{f} y un valor fluctuante f' . Tomando el valor medio y la varianza de la fracción de mezcla $\overline{f'^2}$, se escriben dos ecuaciones de transporte:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{f}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \times \bar{f}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \bar{f} \right) + S_m \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{f'^2}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \times \overline{f'^2}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \overline{f'^2} \right) + C_g \mu_t (\nabla \bar{f})^2 - C_d \rho \frac{\varepsilon}{k} \overline{f'^2} \quad (12)$$

Los términos no definidos son constantes propias del modelo que se pueden extraer de [6].

C. Consideraciones para simulaciones CFD

Se utilizará el software comercial ANSYS FLUENT, el cual es una herramienta con amplias capacidades de modelación física, con aplicaciones en diseño y análisis ingenieril.

Sus solucionadores están basados en el método de discretización espacial de volúmenes finitos, que implica dividir el dominio de trabajo en un conjunto finito de puntos, en torno a los cuales se construyen volúmenes de control que no se traslapan con los de los puntos vecinos. De esta forma el volumen total de fluido resulta ser igual a la suma de los volúmenes de control considerados, para los cuales se resolverán numéricamente las ecuaciones de transporte de masa, cantidad de movimiento, energía, especies, etc. Estas ecuaciones diferenciales resultan también en una versión discretizada que se resuelve algebraicamente. Es importante indicar que esta técnica de discretización es válida tanto para mallas estructuradas y no estructuradas.

Para la simulación CFD se debe seguir una serie de pasos y consideraciones, que se describirán brevemente:

1. Identificación del problema, que para el caso de estudio sería la transferencia de calor en una paila y la cámara de combustión de bagazo. El usuario debe definir el dominio de cálculo y ver si es posible reducir la complejidad de los fenómenos a simulaciones 2D.

2. Fase de pre procesamiento. Destacan dos etapas:

Geometría del dominio de cálculo, que implica las formas y dimensiones. ANSYS tiene la ventaja de importar geometrías de programas CAD afines, o en caso contrario se puede graficar directamente en su propia aplicación *Design Modeler* (DM).

Mallado de la geometría, que consiste en dividir el dominio de cálculo en un gran número de celdas o volúmenes finitos. El usuario es el responsable de definir la densidad de la malla, de modo que sea capaz de capturar gradientes de diferentes variables de interés. A su vez, el tiempo de simulación depende de la malla, por lo que es necesario aplicar diferentes técnicas de mallado como *inflation*, *patch control*, *edge sizing*, *virtual topology*; y tener también indicadores de calidad de malla como el *skewness* y *aspect ratio* para evaluar desde las fases previas de una simulación la correcta convergencia de resultados. La descripción detallada tanto de técnicas como de indicadores se encuentran en [6].

3. Fase de procesamiento. Comprende lo siguiente:

Selección de ecuaciones y modelos matemáticos a utilizar.

Lo más frecuente es activar la ecuación de la cantidad de movimiento y de la energía, definir el modelo de turbulencia, de radiación y de especies.

Definir las condiciones de frontera, es decir, identificar entradas y salidas, así como aquellos elementos que se comportarán como una pared o *wall*. Se requiere de los valores iniciales para la simulación, como el caso de velocidades, flujos másicos, temperatura, presión y fracciones másicas según sea el caso.

Especificar los criterios de convergencia. Al ser simulaciones numéricas, se debe establecer una condición de fin, que puede ser un error relativo o un número máximo de iteraciones.

4. Fase de post procesamiento. ANSYS FLUENT permite mostrar resultados a través de reportes de datos tabulados y gráficos 2D de variables de interés, principalmente. Además, se puede tener videos que capturen alguna fenomenología en especial.

D. Transferencia de calor en una paila

En esta sección se pretende determinar la potencia térmica transmitida en un intervalo de tiempo a una paila aleteada por los gases de combustión producidos por la quema del bagazo. En la figura 3 se muestra el dominio de cálculo.

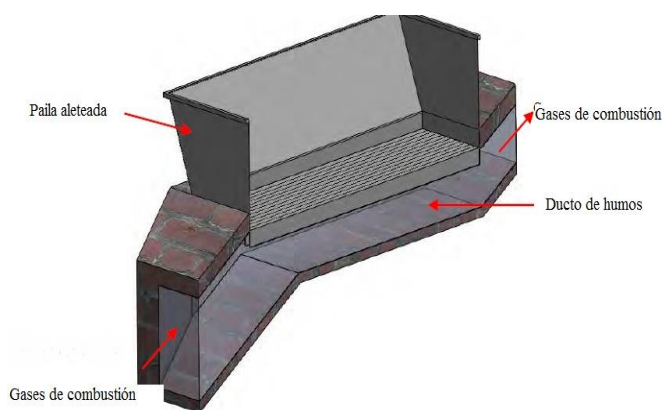


Fig. 3 Esquema de ducto de humos y paila aleteada

En el gráfico anterior, se identifica en la parte inferior el ducto de humos, en la parte superior la paila plana aleteada y en el intermedio el área de transferencia de calor. Los gases de combustión recorren el fondo de la paila (base y aletas) cediendo calor al jugo de la caña de azúcar contenido en la paila, evaporando el agua contenida en el mismo.

Se realizarán dos tipos de análisis, primero se comparará la tasa de transferencia de calor con datos obtenidos experimentalmente, y segundo, evaluar el efecto en la potencia térmica al variar la altura de la paila, medida respecto al piso del ducto de humos.

E. Cámara de combustión de bagazo

El otro proceso relevante para mejorar la eficiencia del módulo está en la cámara de combustión de bagazo. En la figura 4 se muestra la sección media de la cámara utilizada en la hornilla, que definirá el dominio de cálculo y geometría de las simulaciones.

En el lado izquierdo se identifica una puerta de alimentación por donde ingresa el bagazo compactado en bloques de 30cm de altura, los cuales son depositados sobre la parrilla inferior, que a su vez recibe el ingreso transversal de aire primario precalentado para la combustión de la fase sólida. La fase gaseosa que se va desprendiendo del lecho, con alto contenido de monóxido de carbono, sube por la cámara y volverá a reaccionar con el aire secundario que ingresa por unos tubos laterales superiores, así como por la puerta de alimentación, ya que esta permanece abierta durante el quemado del bagazo. Estas condiciones de frontera se identifican en la figura 5.

Los objetivos particulares de este análisis consisten en primer lugar en establecer una metodología numérica que represente el comportamiento de la combustión del bagazo. Y en segunda instancia, analizar variantes en las condiciones de operación para optimizar la energía térmica aprovechada de los productos de combustión, logrando mayores temperaturas de llama.



Fig. 4 Sección media de la cámara de combustión de bagazo

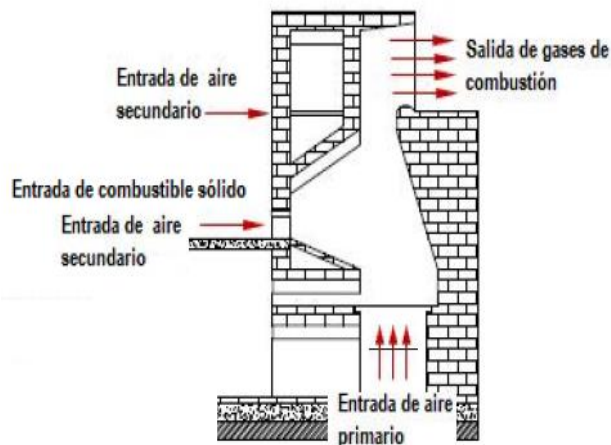


Fig. 5 Condiciones de frontera en la geometría de la cámara

III. RESULTADOS

Con las especificaciones de la sección anterior, se preparó las geometrías de la paila y de la cámara. Se hizo el mallado correspondiente, adensando la cantidad de elementos en aquellas zonas donde es más relevante captar la fenomenología de la simulación. Por ejemplo en el área superior del ducto de humos, así como en la garganta de la cámara de combustión. Se optó por utilizar elementos hexaédricos y tetraédricos, y técnicas de mallado como *virtual topology* y *edge sizing*.

En la tabla I se muestran la cantidad de volúmenes de control y los valores de los indicadores de calidad de malla para cada caso. Es conveniente indicar que el *skewness* varía entre cero y uno, siendo cero el valor óptimo; mientras que el *aspect ratio* debe tender a la unidad.

TABLA I
CARACTERÍSTICAS DE LAS GEOMETRÍAS MALLADAS

Datos e indicadores de malla		Ducto de gases y paila	Cámara de combustión
Número de elementos		324000	350823
Skewness	Promedio	0.011	0.0139
	Desviación estándar	9.17E-03	6.74E-02
Aspect Ratio	Promedio	24.536	1.071
	Desviación estándar	25.739	0.2511

Para la simulación del ducto de gases y paila se activó la ecuación de la cantidad de movimiento (2), de la energía (3) y el modelo de turbulencia k-epsilon estándar (4), (5) y (6).

En el caso de la combustión, también se utilizó la ecuación de la energía y cantidad de movimiento, sin embargo fue necesario contar con más modelos para tener un comportamiento más real de los fenómenos presentados. En esta sección, el modelo de turbulencia utilizado fue el k-

epsilon RNG (4), (5) y (7), modelo de radiación P-1 (8) y (9), y para el caso de especies el modelo *non-premixed combustion* (10), (11) y (12). Todas las ecuaciones de transporte anteriormente indicadas se especifican en [6].

En ambas simulaciones se trabajó con criterios de convergencia de errores de 1E-04 para todas las variables a excepción de la energía, donde se utilizó un error de 1E-06.

A. Transferencia de calor en una paila

La simulación se realizó en la primera paila de evaporación, que corresponde a la última en contacto con los gases de combustión, ya que el intercambio de calor es a contracorriente.

En la tabla II se muestran las propiedades de los gases en la sección de entrada, así como la temperatura en la base de la paila que corresponde a la temperatura de ebullición del jugo de caña de azúcar a presión atmosférica. Estos valores son los datos iniciales de la simulación.

TABLA II
GASES DE COMBUSTIÓN EN LA ENTRADA DEL DUCTO

Flujo másico de gases	0.6114 kg/s
Temperatura entrada	795 K
Fracción de CO	0.06278
Fracción de CO2	0.08488
Fracción de N2	0.6251
Fracción de O2	0.08374
Fracción de H2O	0.1435
Temperatura base paila	369.55 K

Luego de realizar la simulación y como parte de los resultados, se aprecia el campo de temperatura en la figura 6.

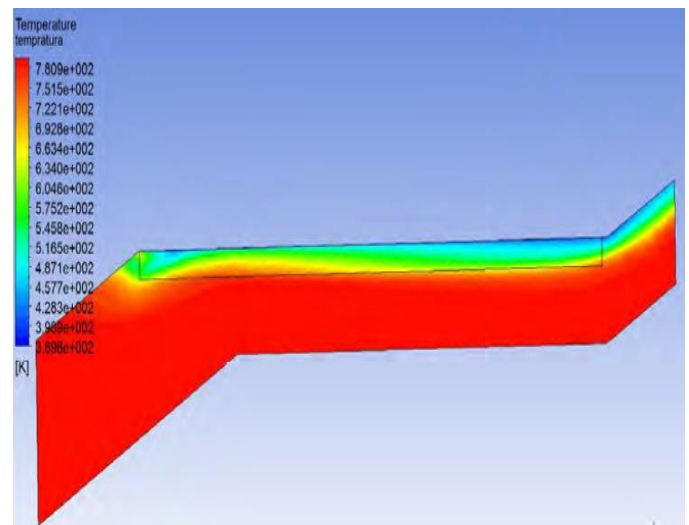


Fig. 6 Campo de temperatura en el plano medio del ducto de gases

Del gráfico anterior se aprecia la disminución de temperatura de los gases a medida que se acercan a la base de la paila. De color rojo se tiene la máxima temperatura y de color azul los registros más bajos ubicados en el área de contacto. Mientras más pronunciado sea este cambio de colores en ANSYS, significará una transferencia de calor más efectiva.

Para validar los resultados de la simulación se comparó con valores experimentales obtenidos del módulo de Santa Rosa. Las dos variables más relevantes fueron la potencia térmica de transferencia de calor y la temperatura de los gases a la salida del ducto. En la tabla III se muestra dicha comparación.

TABLA III
COMPARACIÓN DE SIMULACIÓN CON DATOS EXPERIMENTALES

	Simulación	Experimental	Error
Potencia térmica	88619.04 W	91714.36 W	3.37 %
Temperatura salida	735.64 K	740.68 K	0.68 %

Por los errores relativos obtenidos, se garantiza que las condiciones de simulación están reflejando el comportamiento real de la transferencia de calor de una forma muy aproximada. A partir de ello, se pasa a variar la altura del ducto de humos que actualmente mide 37cm, para analizar su efecto en las dos variables importantes. El resumen de resultados de estos casos se aprecia en la tabla IV.

TABLA IV
EFECTO DE LA VARIACIÓN DE ALTURA DEL DUCTO DE GASES

Altura ducto de gases	Potencia térmica	Temperatura salida
37 cm	88619.04 W	735.64 K
32 cm	104412.16 W	725.05 K
27 cm	125039.08 W	711.20 K
22 cm	161441.8 W	695.07 K
17 cm	191203.15 W	667.02 K

Se deduce que a medida que disminuya la altura del ducto aumentará la potencia térmica, siendo mayor la tasa de transferencia de calor, lo que ocasiona que los gases salgan con menor temperatura por toda la energía cedida. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que mientras más disminuye la altura, la velocidad de los gases aumentará considerablemente para cumplir con el balance de masa, ocasionando mayores caídas de presión. Por este motivo y cuestiones prácticas de construcción, puede llegar a reducirse hasta 22cm de altura y obtener mejores resultados en el aprovechamiento térmico de los gases de combustión, ya que la potencia térmica puede llegar hasta duplicarse.

En la figura 7 se muestra la distribución de temperatura en el plano medio del ducto de gases luego de simular con una altura de 22cm, rescatando que el color rojo intenso ocupa prácticamente la mitad del ducto, área mucho menor al de la figura 6.

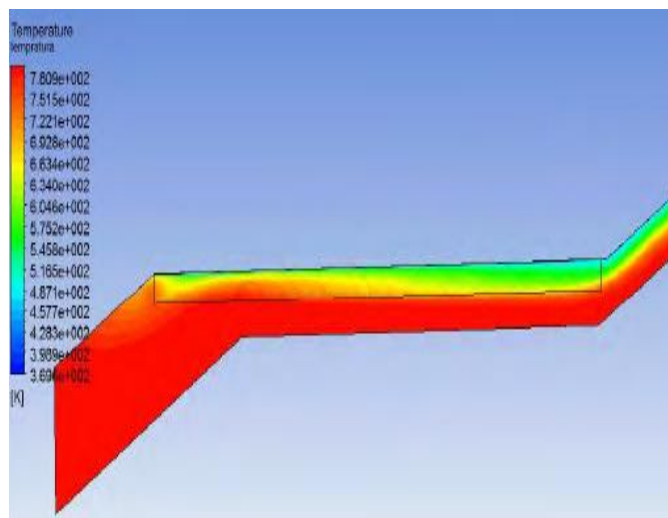


Fig. 7 Campo de temperatura en el plano medio del ducto de gases con altura de 22cm

En estudios futuros, se evaluará modificar la geometría de la paila, es decir analizar la influencia que tiene la forma del área de contacto en la transferencia de calor, así como el hecho de determinar numéricamente los coeficientes de convección.

B. Cámara de combustión de bagazo

Para el caso del quemado directo del bagazo, se inicia con los valores mostrados en la tabla V, correspondientes a los datos actuales de operación. Es importante mencionar que toda la combustión se da con un 60% de exceso de aire estequiométrico. Además, de este total de aire ingresado a la cámara, 70% corresponde a aire primario precalentado que ingresa por la parrilla, y el 30% restante corresponde a aire secundario que se reparte entre la puerta de alimentación y los tubos laterales.

TABLA V
DATOS DE CONDICIONES DE OPERACIÓN

Flujo másico de bagazo	0.0917 kg/s
Humedad del bagazo	30%
Flujo másico total de aire	0.5197 kg/s
Temperatura aire primario	473 K
Temperatura aire secundario	300 K

Se plantearon dos simulaciones, en primer lugar con las condiciones actuales de operación, es decir, aire secundario por puerta y tubos; mientras que en un segundo escenario se probó mantener cerrada la puerta de alimentación, de modo que todo el aire secundario ingrese únicamente por los tubos.

En la tabla VI se muestra esta comparación, resaltando la temperatura media de los productos de combustión a la salida, así como las medias de fracciones en masa de oxígeno, monóxido de carbono y dióxido de carbono. Todos estos parámetros son indicadores de que tan completa fue la reacción de combustión. Además, es importante evaluar la distribución de temperatura al interior de la cámara, por lo que en las figuras 8 y 9 se muestran los campos de temperatura en el plano medio y sección de salida para los dos casos analizados.

TABLA VI
RESULTADOS CON 30% DE AIRE SECUNDARIO

	Aire secundario por puerta y tubos	Aire secundario sólo por tubos
Temperatura salida	1412.24 K	1505.46 K
Fracción de CO	0.0691	0.048
Fracción de CO ₂	0.0906	0.1019
Fracción de O ₂	0.0939	0.1007

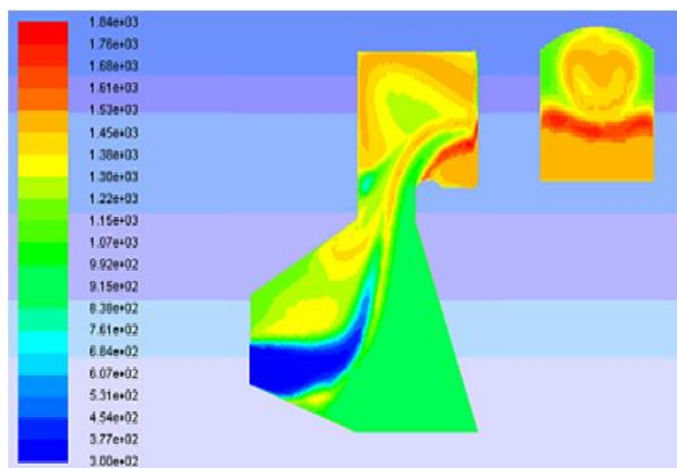


Fig. 8 Campo de temperatura con 30% de aire secundario que ingresa por puerta y tubos

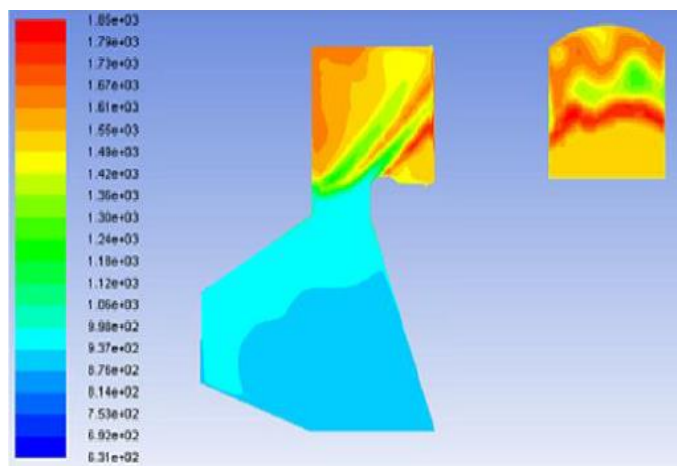


Fig. 9 Campo de temperatura con 30% de aire secundario que ingresa sólo por tubos

Del primer gráfico se interpreta que en la mitad superior de la sección de salida se forma un foco caliente representado por una zona circular, que a medida que se acerca a las paredes disminuye considerablemente la temperatura, cambio de color amarillo a verde. La fracción media de monóxido de carbono es prácticamente 7%, que se concentra en la mitad inferior y que no puede reaccionar porque no encuentra oxígeno suficiente, ya que este se ubica en el foco caliente. También se aprecia que se alcanza una temperatura media a la salida, mayor a 1400 K, pero podría ser mayor, si se mejora el mezclado o grado de reacción de la combustión.

Al simular la combustión del bagazo con la puerta de alimentación cerrada se logran mejores resultados, ya que el perfil de temperatura de la figura 9 es más homogéneo en la sección de salida, resalta más los colores de alta temperatura y hay menos espacio de color verde. Este hecho se reafirma al tener un valor promedio de 1500 K aproximadamente, que se corresponde con la disminución de monóxido de carbono que ahora es del orden del 5%. La parte inferior de la cámara se comporta más como una zona de transporte y toda la reacción se da en la parte superior de la garganta, ya que el oxidante ingresa sólo por tubos, dejando de apreciarse una zona azul de aire frío presente en la figura 8 al lado de la puerta. Conviene más que el aire ingrese por la parte superior a mayor velocidad y reaccione lo más rápido posible para que no exista una zona de enfriamiento.

Con las mejoras que supone el hecho de mantener cerrada la puerta de alimentación, se realizó una variante adicional que consiste en ingresar 60% de aire primario y 40% de aire secundario. Los resultados se muestran en la tabla VII y figura 10, rescatando el aumento de temperatura de los productos de combustión, que garantizarán una mejor transferencia de calor en la etapa de evaporación en las pailas.

TABLA VII
RESULTADOS CON 40% DE AIRE SECUNDARIO

Temperatura salida	1541.23 K
Fracción de CO	0.0333
Fracción de CO ₂	0.1079
Fracción de O ₂	0.1097

En la sección de salida se nota una mayor área de color rojo intenso, más uniforme, que en promedio alcanza los 1540 K. A su vez, la eficiencia de combustión también aumenta ya que el contenido de monóxido de carbono ha disminuido aún más, llegando al orden del 3%, debido a que reaccionó con ese oxígeno adicional que se tiene en la parte superior de la cámara, formando mayor cantidad de dióxido de carbono, lo que implica una combustión más completa.

Con estos resultados prácticos, puede optarse en el futuro por modificar la forma en que ingresa el aire secundario, ya no de forma lateral, sino alrededor de toda la garganta, así como

variar la geometría de la cámara, desde reducir su altura hasta diseñarla con lados cilíndricos para que concentren e irradian la energía desprendida de la combustión sobre un eje central.

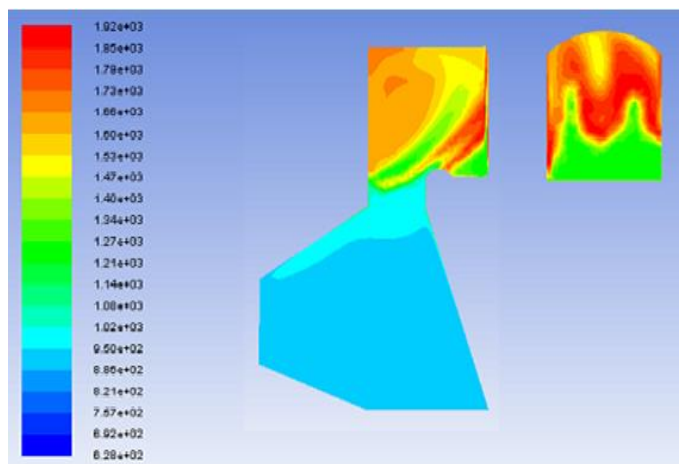


Fig. 10 Campo de temperatura con 40% de aire secundario que ingresa sólo por tubos

IV. CONCLUSIONES

En primer lugar, destacar la importancia de la Mecánica de Fluidos Computacional como una herramienta de simulación que supone ahorro en costo y tiempo desde la fase de diseño de alguna aplicación, ya que reduce el número de prototipos que se podrían llegar a construir. Además, que permite realizar variantes y desarrollar análisis de sensibilidad de parámetros.

Con la necesidad de buscar fuentes alternativas de energía, se presenta la agroindustria de producción de panela como un sector propicio de investigación, ya que el recurso biomásico es abundante en el norte del Perú y el proceso involucra los principales fenómenos termodinámicos.

La transferencia de calor en una paila mejora notablemente al disminuir la altura del ducto de gases. Se recomienda una altura entre 20 y 25cm, de modo que se aproveche mejor la potencia térmica de los productos de combustión, pudiendo obtener el doble de potencia térmica respecto al potencial aprovechado actualmente.

En cuanto a la cámara de combustión de bagazo, se concluye que debe mantenerse cerrada la puerta de alimentación el mayor tiempo posible, permitiendo que el aire secundario sólo ingrese por los tubos laterales. Además, que la proporción de 60% de aire primario y 40% de aire secundario es más adecuada, ya que se consigue una mejor y más completa combustión, que se manifiesta en una mayor temperatura promedio de los productos de combustión, llegando a alcanzar los 1540 K, más de 100 grados respecto a las condiciones actuales.

Se recomienda que el aire secundario ingrese por completo en la parte superior de la cámara a una mayor

velocidad, de modo que se desarrolle una combustión más homogénea, con un mezclado correcto y la mayor parte del monóxido de carbono pueda convertirse en dióxido de carbono. Con la proporción de 40% de aire secundario, se obtiene en promedio un 3% de fracción de masa de CO en la sección de salida, reduciendo niveles de contaminación actuales.

Finalmente, tomar esta metodología y resultados como una investigación inicial para proyectos futuros, donde se puedan diseñar hornillas paneleras más eficientes, que supongan la sostenibilidad energética en zonas rurales de nuestra región aprovechando los residuos de la caña de azúcar como fuente de energía.

REFERENCIAS

- [1] Universidad de Piura. “Estudio e investigación teórica experimental del proceso de obtención de panela granulada a partir de la caña de azúcar”. Proyectos CONCYTEC-PROCOM 2008-2010.
- [2] Universidad de Piura. “Diseño innovativo e implementación de un prototipo de cámara de combustión y del sistema de pre-tratamiento del bagazo para módulos de producción agroindustrial de azúcar orgánico en las comunidades de la sierra de Piura”. Proyectos CONCYTEC-PROCOM 2008-2011.
- [3] E.Ozden, I.Tari. Shell side CFD analysis of a small shell-and-tube heat exchanger. *Energy Conversion and Management* Volume 51, Issue 5, May 2010, Pages 1004–1014. 2010
- [4] H. Van der Vyver, J.Dirker, J. Meyer. Validation of a CFD model of a three-dimensional Tube-in-tube heat exchanger. *Third International conference on CFD in the Minerals and process Industries CSIRO, Melbourne, Australia. 2003.*
- [5] P.K. Nagarajan, P. Sivashanmugam. CFD Simulation of Heat Transfer Augmentation in a Circular Tube Fitted with Right-left Helical Inserts with Spacer. *International Journal of ChemicalEngineeringResearch* Volume 1, Number 1 (2009), pp. 1–11. 2009.
- [6] AnsysFluent 12.0. TheoryGuide. 2009.
- [7] R. La Madrid. “Uso eficiente de la energía térmica producida por la combustión de biomasa” Tesis para obtener grado de magister. 2012.
- [8] R. La Madrid, D. Marcelo, L.F. Figueira. “Modelación del proceso de transferencia de calor utilizando dinámica de fluidos computacional en intercambiadores de calor abiertos – caso estudio de una paila aleteada de una hornilla panelera”. CAIP 2013.
- [9] T.F. Dixon, A.P. Mann, F. Plaza, W.N Gilfillan. “Development of advanced technology for biomass combustion – CFD as an essential tool”. *Sugar Research Institute, Box 5611, Mackay, Australia. Elsevier, Fuel* 84, 2005, pp 1303-1311.
- [10] M. Miltner, A. Makaruk, M. Harasek, A. Friedl. “CFD-Modelling for the combustion of solid baled biomass”. *Applied Thermal Engineering* 27-7, 2007, pp 1138-1143.
- [11] C.Yin, L. Rossendahl, L. Kaer, S. Clausen, L. Hvid, T. Hille. “Mathematical modeling and experimental study of biomass combustion in a thermal 108MW grate-fired boiler”. *Energy* 41-1, 2012, pp 473-482.
- [12] C. Quispe. “Una metodología numérica para la simulación de la combustión de biomasa y su aplicación en el análisis del ingreso de aire a la cámara de combustión de una hornilla panelera”. Tesis para obtener grado de magister. 2014.
- [13] C. Quispe, R.Saavedra, F. Rspoli. “Simulación numérica CFD en el análisis del ingreso de aire secundario en una cámara de combustión de bagazo”. ESSS 2014.