



Componente II

Eficiencia energética, calidad
y diversificación del uso de
subproductos y derivados del
proceso de producción de
panela



Capítulo 8

Diseño y dimensionamiento de una cámara de combustión tipo Ward-Cimpa mejorada

John Javier Espitia González, Fabián Andrés Velásquez Ayala, Oscar Andrés Mendieta Menjura y Jader Rodríguez Cortina

Resumen

Actualmente, el proceso de combustión en la producción de panela es ineficiente en la mayoría de los trapiches que existen, por lo que se hace necesario suplir la carencia de energía con otros tipos de combustibles, y esto genera un sobre costo de producción y un mayor impacto ambiental. El objetivo de esta investigación fue ajustar el diseño de una cámara Ward-Cimpa (150 kg de panela/h) a una menor escala de producción (90 kg de panela/h). Para cumplir con este propósito, se diseñó, construyó y evaluó un prototipo de combustión de bagazo. La evaluación del prototipo de combustión se realizó considerando parámetros técnicos como la eficiencia de combustión (%), la potencia calorífica (kW) y la temperatura de combustión (°C), y parámetros ambientales como kg de CO y CO₂/h (%) y el consumo de bagazo (kg/h). Con la propuesta de cámara de combustión Ward-Cimpa mejorada, se logró reducir la altura de la cámara y mantener su relación de volumen para suplir la demanda energética a una escala de producción de 90 kg de panela/h, por lo cual podría ser una alternativa técnicamente viable para sistemas tradicionales de producción de panela de pequeña escala.

Palabras clave: biomasa, bagazo, dinámica de flúidos computacional, hornilla panelera

Introducción

La energía requerida para evaporar el agua del jugo de caña de azúcar para la producción de panela se obtiene de la transformación termoquímica del bagazo. El bagazo obtenido durante la molienda de la caña de azúcar tiene el potencial para suplir la energía térmica del proceso. Sin embargo, diferentes estudios reportan que del calor suministrado a una hornilla panelera se pierde el 71,4 %, del cual el 80 % se pierde con los gases de chimenea, el 19,7 % con los inquemados y pérdidas por paredes y el 0,3 % con las cenizas (Anwar, 2010).

Con respecto al proceso de combustión en hornillas tradicionales, se han usado dos tipos de cámaras de combustión en lecho fijo: cámara plana y cámara Ward (La Madrid et al., 2016; Sánchez Castro & Mendieta Menjura, 2014). El diseño de la cámara plana es el más utilizado en las unidades de producción de panela (trapiches). Este tipo de cámaras son de forma rectangular, con un volumen de reacción limitado, que consiste en una entrada para el suministro de combustible y otra para la entrada de aire de combustión primaria. Sin embargo, este diseño se ha realizado empíricamente, sin incluir aspectos teóricos o modelos matemáticos para la combustión del bagazo (Velásquez et al., 2021). Un problema común que tiene esta cámara es el diseño del lecho de combustible, donde los procesos de secado, volatilización y oxidación del carbón se producen de manera irregular a lo largo de la parrilla. Como resultado, la formación de volátiles no es homogénea y se generan zonas enriquecidas de estos que el aire no puede oxidar por completo antes de que se liberen de la zona de combustión. Por lo tanto, se obtienen bajas temperaturas de combustión (por ejemplo, de 650-850 °C con bagazo al 30 % b. h.), tiempos de residencia inadecuados (cortos o prolongados), altas tasas de emisión de monóxido de carbono (~5 % de CO) y un consumo específico de combustible más alto (Gordillo Ariza & García Bernal, 1992).

Para resolver este tipo de problemas, se ha usado la modelación matemática y la simulación del proceso como herramientas de

diseño, lo cual ha permitido generar equipos mejorados, como la cámara Ward-Cimpa (Rodríguez et al., 2018). En contraste con la cámara plana, la cámara Ward-Cimpa tiene un volumen de reacción cuatro veces mayor, y su diseño considera una rampa de presecado, una zona de combustión primaria en un lecho fijo y entradas de aire secundario en la parte superior del lecho, para la reacción de volátiles y material no quemado (Karim & Naser, 2017). Este diseño permite alcanzar mayores temperaturas de combustión, entre 850 y 1.200 °C, con una humedad de bagazo entre el 45 y el 15 % (b. h.). Además, esta cámara disminuye las emisiones de CO al 1 % (Velásquez et al., 2021), lo que permite un incremento significativo de la eficiencia térmica y la disminución de los tiempos de residencia del jugo de caña en el proceso. Sin embargo, estas cámaras de combustión están recomendadas para capacidades de producción superiores a los 150 kg de panela/h.

Las investigaciones experimentales de este tipo de cámara de combustión revelan dificultades por el acceso limitado y la falta de homogeneidad dentro del lecho. Por tanto, la dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) es una herramienta efectiva en este tipo de hornos, pues permite una mejor comprensión del fenómeno térmico de la conversión de la biomasa y la optimización del proceso de combustión (Gómez et al., 2015). Las técnicas de modelado de CFD han permitido analizar el rendimiento de los equipos de conversión termoquímica, pues es posible predecir variables como el comportamiento del flujo de fluidos, la transferencia de masa de calor (devolatilización y combustión), cambios de fase, entre otros (Wang & Yan, 2008).

A partir de estos estudios, ha sido posible establecer que una proporción adecuada en el suministro de aire primario y secundario, así como una mayor velocidad de inyección de este último, contribuyen a mejorar la tasa de liberación de calor en el proceso de combustión. Estos resultados tienen impactos ambientales positivos, ya que disminuyen el uso específico de bagazo y otras fuentes de combustibles contaminantes, como carbón y llantas, con lo que se reducen las emisiones (CO, CO₂,

NO_x y SO_x), los costos de producción y la deforestación en las zonas rurales cuando se utiliza leña (Rodríguez et al., 2018).

Debido a la necesidad de mejorar los procesos productivos de panela en Colombia en cuanto a la eficiencia energética y la sostenibilidad económico-ambiental, el objetivo de este trabajo fue ajustar una cámara de combustión tipo Ward-Cimpa para unidades productoras de panela de pequeña escala (<100 kg de panela/h), conservando las ventajas de una cámara de combustión Ward-Cimpa.

Metodología

Se desarrolló un prototipo de cámara Ward-Cimpa mejorado para una escala de producción de 90 kg de panela/h. Se siguió la metodología de dimensionamiento de unidades productoras de panela reportada por Espitia et al. (2020). El objetivo del uso de este método fue determinar el volumen y el área de la parrilla en función de la cantidad de panela por producir. Luego, se ajustó el diseño para mantener el volumen de una cámara Ward-Cimpa disminuyendo la altura y empleando secciones curvas (superficies radiantes) para aumentar el factor de visión sobre la flama. Posteriormente, se simuló el prototipo con herramientas de CFD. Finalmente, se construyó la cámara de combustión para una escala de producción de 90 kg de panela/h con los parámetros y materiales de diseño detallados, y, por último, se validó.

Diseño de la cámara de combustión

El requerimiento térmico del proceso para el dimensionamiento de la cámara de combustión se basó en el modelo OD propuesto por Espitia et al. (2020) y en los balances de energía y materia. Con esta información, se procedió a determinar el volumen y las dimensiones de la parrilla, la rampa de secado, la garganta, las entradas auxiliares de aire y la entrada inferior para el limpiado de la parrilla, considerando las recomendaciones descritas en el manual de hornillas paneleras de Gordillo Ariza y García Bernal

(1992). Por último, después de determinar el volumen de la cámara de combustión y sus dimensiones generales, se determinaron las pérdidas por las paredes de la cámara.

Simulación de la cámara de combustión

Dominio computacional

La simulación se hizo sobre la geometría de la cámara de combustión resultante del ajuste del diseño de una cámara Ward-Cimpa (figura 8.1). El dominio utilizado en este caso está formado por los gases de combustión, los cuales son transportados por la cámara por efecto del tiro generado en la chimenea. El modelo de la cámara de combustión Ward-Cimpa mejorado se presenta en la figura 8.1.

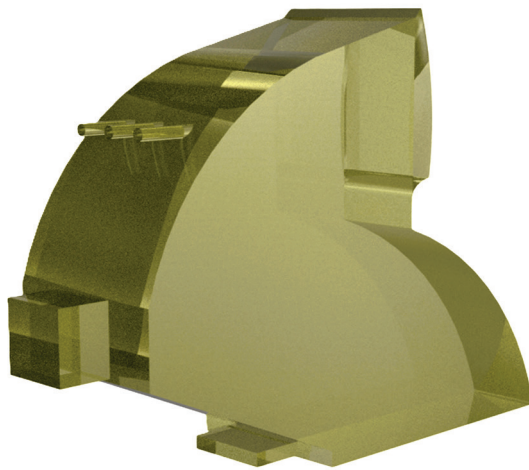


Figura 8.1. Diseño del modelo de cámara de combustión Ward-Cimpa mejorado.

Fuente: Elaboración propia

Para la ecuación de transporte, el modelo de turbulencia de transporte de esfuerzo cortante y el modelo de radiación (armónicos esféricos, aproximación P1 y suma ponderada de gases grises), se consideraron los modelos y ecuaciones reportados por La Madrid et al. (2016).

Preprocesamiento y configuración del solucionador

Se utilizó el *software* Ansys *CFX* para obtener una solución numérica en estado estacionario (Espitia et al., 2020). Esta herramienta computacional utiliza un enfoque híbrido único de elementos/volúmenes finitos para discretizar las ecuaciones de Navier-Stokes (Ansys, 2013). La tabla 8.1 muestra los datos de entrada para la simulación, incluyendo el bagazo, el aire y las propiedades del gas cuando la cámara alcanza el equilibrio térmico (Espitia et al., 2020).

Tabla 8.1. Datos de entrada para la simulación de la cámara de combustión Ward-Cimpa mejorada

Corriente	Variable	Valor
Bagazo	Flujo (kg/h)	237,6
	Humedad (%)	40
Aire	Exceso de aire (%)	80
Gases de combustión	CO ₂ producido (kg)	272,11
	CO producido (kg)	9,12
	H ₂ O total (kg)	169,60
	O ₂ producido (kg)	181,91
	N ₂ producido (kg)	1.308,74
	Gas total (kg/h)	1.941,47
	Velocidad inicial (m/s)	7,89
	Temperatura de flama (°C)	1.160,36
	Energía inicial de gas (kW)	748,73

Fuente: Elaboración propia

Evaluación del equipo construido

La cámara de combustión se construyó considerando los detalles de diseño de la figura 8.2 (superficies radiantes). Se utilizó ladrillo

refractario para disminuir las pérdidas de calor y una parrilla en fundición para resistir las temperaturas alcanzadas en el proceso. Además, se calcularon las pérdidas de potencia por los distintos mecanismos de transferencia de calor (radiación y convección) que suceden en la cámara.

El bagazo suministrado a la cámara de combustión se pesó con una balanza electrónica KERN HCB 200K500. El consumo de combustible se midió por triplicado con muestras aproximadas de 100 kg de bagazo, con un contenido de humedad del 40 % (b. h.). El contenido de humedad inicial del bagazo se determinó de acuerdo con las normas de la Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 2000). Para la medición de la temperatura, se instalaron termopares tipo κ sobre la cámara de combustión, la cual se conectó a un sistema de adquisición de datos Intech Micro 2100-A16 programado para registrar mediciones cada 60 s durante cada lote de producción. La composición de los gases de combustión (CO_2 , CO y O_2) se midió en la chimenea a una altura de 4 m desde la base, con un analizador Testo 350 s/xL. Las mediciones se realizaron durante 30 min con un intervalo de tiempo de 15 s.

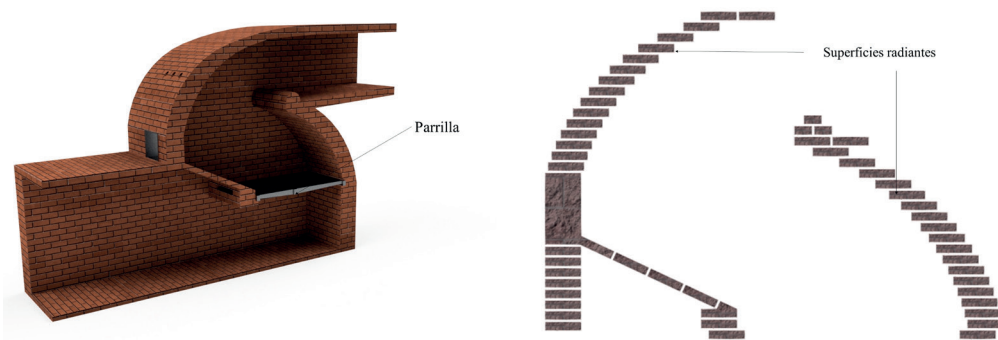


Figura 8.2. Diseño propuesto para la cámara de combustión Ward-Cimpa mejorada.

Fuente: Elaboración propia

Resultados y discusión

Diseño de la cámara de combustión

A la cámara de combustión Ward-Cimpa ajustada se le modificaron las dos superficies radiantes (figura 8.2): se dispuso una superficie curva sobre el plano ortogonal a la parrilla, a fin de obtener una mayor superficie radiante sobre la parrilla, y otra superficie curva sobre el plano tangente a la entrada de bagazo, con el fin de obtener una superficie radiante mayor sobre la rampa de secado. Por otro lado, se logró mantener el volumen requerido para la generación de la potencia térmica requerida por el proceso sin necesidad de aumentar el volumen de la cámara, como sucede en el diseño original. Además, se redujo la altura del cenicero sin comprometer la ergonomía del personal encargado de la limpieza. Los ladrillos refractarios permitieron, por sus características, mantener el calor al que son expuestos y evitar su disipación a los alrededores, lo que redujo la pérdida de calor que normalmente ocurre en el proceso.

Simulación de la cámara de combustión

Para evaluar los cálculos teóricos de la cámara de combustión, se utilizó el *software* CAE Ansys, con en el módulo de fluidos CFX. Los resultados de la simulación permitieron determinar el cambio de temperatura y el movimiento de los gases dentro de la cámara de combustión, como se muestra en la figura 8.3.

Se observa que los gases de combustión mantienen su temperatura en su paso por la cámara (figura 8.3a) debido a la forma y al material refractario utilizado. Además, se produce suficiente energía para calentar la rampa de entrada de bagazo, a través del mecanismo de radiación. Las superficies radiantes de la cámara de combustión (inferior y superior) permitieron una distribución y un flujo de los gases de combustión adecuados (figura 8.3b), lo que evita que haya zonas muertas o estancadas, por lo que el diseño propuesto cumplió con lo esperado.

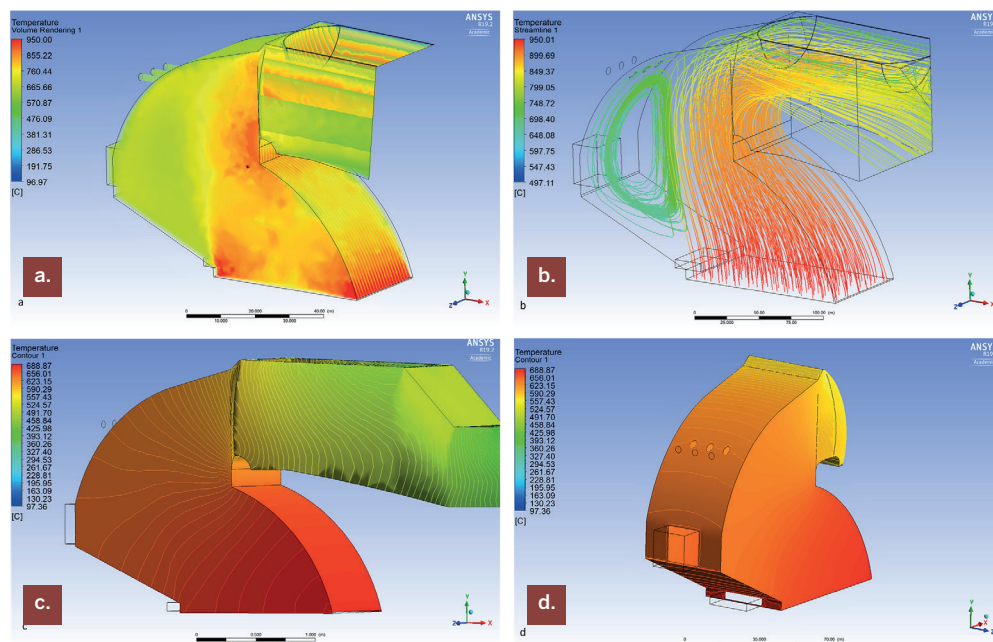


Figura 8.3. Temperatura y movimiento de los gases en la cámara de combustión Ward-Cimpa mejorada, con superficies radiantes en los arcos inferior y superior.

Fuente: Elaboración propia

En las figuras 8.3c y 8.3d se observan las superficies radiantes de los arcos inferior y superior; gracias a ellas es posible mantener una temperatura elevada dentro de la cámara de combustión, en la cual predomina el mecanismo de transferencia de calor por radiación dentro del volumen control.

Evaluación de la cámara de combustión

Los resultados de la simulación fueron validados con datos en campo, para lo cual se construyó la cámara de combustión acorde con los diseños propuestos en la Unidad Productiva de Famiempresas de San Isidro, ubicada en Ricaurte, Nariño. El consumo promedio del bagazo suministrado a la cámara de combustión fue de 213,02 kg/h, que fue cercano al valor calculado (237 kg de bagazo/h). La temperatura promedio de la cámara fue de 1.025 °C,

con un máximo de 1.160 °C después de 3 h de operación de la hornilla. Estos valores de temperatura son adecuados para el tipo de combustible utilizado, lo que permite asegurar una eficiencia de combustión superior al 99 %.

Las emisiones producidas por la cámara de combustión fueron evaluadas en la chimenea (tabla 8.2). Los valores altos de CO₂ y bajos de CO permiten establecer un proceso de combustión adecuado, teniendo en cuenta que el gas de mayor interés para una combustión completa es el CO₂, debido a que es el que mayor energía libera durante su formación en comparación con los demás gases generados en la combustión del bagazo. Asimismo, con respecto al porcentaje de aire en exceso en el proceso, este se mantuvo alrededor del 60 %; para sistemas de combustión de biomasa en lecho fijo, como es el caso del bagazo en la hornilla, es un valor adecuado según lo reportado por Rodríguez et al. (2018). Adicionalmente, el valor del 60 % de exceso indica que el tamaño de la parrilla calculado para la entrada de aire primario es el adecuado para lograr un proceso de combustión eficiente.

Tabla 8.2. Parámetros de la combustión del bagazo en lecho fijo con la cámara Ward-Cimpa mejorada

Parámetro	Valor
CO ₂ (kg/h)	305,13 ± 10,91
CO (kg/h)	2,84 ± 1,6
Temperatura en la cámara (°C)	1.015 ± 59,46
Exceso de aire (estequiométrico = 1)	1,63 ± 0,52

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la evaluación permitieron corroborar los resultados de la simulación, para los cuales se obtuvo una eficiencia de combustión del 99 %. La diferencia entre el valor de temperatura calculado (950 °C) y el obtenido en la evaluación

(1.015 °C) permite confirmar una buena bondad de ajuste entre dichos valores calculados y los medidos en campo. Además, el consumo de bagazo se mantuvo en el rango esperado del diseño para producir 90 kg de panela/h, por lo que el prototipo podría ser de interés para nuevos módulos de producción de panela de pequeños y medianos productores que requieran optimizar la generación y el uso de la energía. Los resultados de la cámara de combustión Ward-Cimpa mejorada permiten tener procesos autosuficientes, en los que solo se usa el bagazo obtenido del proceso de molienda. Su alta eficiencia de combustión (99 %) permite disponer del flujo de calor necesario para suplir las demandas energéticas en la evaporación del jugo de caña para la producción de panela, lo que maximiza el aprovechamiento del poder calorífico del bagazo para la generación de energía térmica.

Conclusiones

El diseño de una cámara de combustión Ward-Cimpa mejorada logró reducir la altura de la cámara y mantener su relación de volumen para suplir la demanda energética a una escala de producción de 90 kg de panela/h, por lo cual podría ser una alternativa técnicamente viable para los sistemas tradicionales de producción de panela de pequeña escala. Adicionalmente, al ser una cámara que opera con bagazo con un contenido de humedad de $\leq 40\%$ (b. h.), disminuye la dependencia del bagazo seco ($\leq 30\%$ b. h.) que tienen los productores para poder operar en las cámaras tradicionales. Lo anterior permite reducir el área de infraestructura del trapiche, al requerir un menor espacio para el almacenamiento y secado natural del bagazo.

La simulación del proceso de combustión usando CFD se presenta como una herramienta útil para el diseño y dimensionamiento de las cámaras de combustión con una buena correlación entre los datos calculados y los medidos en campo.

Agradecimientos

Agradecemos a la Gobernación de Nariño y al Sistema General de Regalías por la financiación de los proyectos ejecutados por AGROSAVIA en el convenio 1976 de 2016, y a los demás integrantes del proyecto “Mejoramiento de la eficiencia del proceso de combustión de bagazo y de transferencia de calor en los trapiches paneleros, mediante la implementación de quemadores de biomasa y sistemas pirotubulares de transferencia de calor”.

Referencias

- Ansys. (2013). *Ansys fluent theory guide*.
- Anwar, S. I. (2010). Fuel and energy saving in open pan furnace used in jaggery making through modified juice boiling/concentrating pans. *Energy Conversion and Management*, 51(2), 360-364. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.09.033>
- Association of Official Analytical Chemists (AOAC). (2000). *Official methods of analysis* (17.^a ed.).
- Espitia, J., Velásquez, F., López, R., Escobar, S., & Rodríguez, J. (2020). An engineering approach to design a non-centrifugal cane sugar production module: A heat transfer study to improve the energy use. *Journal of Food Engineering*, 274, artículo 109843. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109843>
- Gómez, M. A., Porteiro, J., Patiño, D., & Míguez, J. L. (2015). Eulerian CFD modelling for biomass combustion. Transient simulation of an underfeed pellet boiler. *Energy Conversion and Management*, 101, 666-680. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.003>
- Gordillo Ariza, G., & García Bernal, H. R. (1992). *Manual para el diseño y operación de hornillas paneleras*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica).
- Karim, M. R., & Naser, J. (2017). Numerical modelling of solid biomass combustion: Difficulties in initiating the fixed bed combustion. *Energy Procedia*, 110, 390-395. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.158>
- La Madrid, R., Marcelo, D., Mendoza Orbegoso, E., & Saavedra, R. (2016). Heat transfer study on open heat exchangers used in jaggery

- production modules – Computational Fluid Dynamics simulation and field data assessment. *Energy Conversion and Management*, 125, 107-120. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.005>
- Rodríguez, J., Velásquez, F., Espitia, J., Escobar, S., & Mendieta, O. (2018). Thermal performance evaluation of production technologies for non-centrifuged sugar for improvement in energy utilization. *Energy*, 152, 858-865. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.127>
- Sánchez Castro, Z., & Mendieta Menjura, O. A. (2014). Ajuste de un modelo matemático para la combustión de bagazo de caña en una cámara Ward-Cimpa. *Revista Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 15(2), 133-151. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=449945182001>
- Velásquez, F., Espitia, J., Hernandez, H., Mendieta, O., Escobar, S., & Rodríguez, J. (2021). Improving the thermal, productive, and environmental performance of a non-centrifugal cane sugar production module using a heat recovery system. *Journal of Food Engineering*, 308, artículo 110688. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110688>
- Wang, Y., & Yan, L. (2008). CFD studies on biomass thermochemical conversion. *International Journal of Molecular Sciences*, 9(6), 1.108-1.130. <https://doi.org/10.3390%2Fijms9061108>

