

Sistema para el calentamiento de fluidos alimentarios aprovechando los excesos de energía provenientes de gases de combustión

Sector tecnológico

La presente solicitud de patente se refiere a un mecanismo para el aprovechamiento de excesos energéticos en hornillas paneleras, que utiliza la energía disponible proveniente de los gases de chimenea. El artefacto se acopla y ajusta a hornillas paneleras tradicionales, logrando una optimización de los flujos de calor propios del proceso. Este novedoso dispositivo permite disminuir el potencial de impacto ambiental, y aumentar el rendimiento energético y productivo global de la operación.

Tecnología anterior

La panela es un producto alimenticio natural e integral obtenido a partir de la extracción, clarificación y evaporación de jugos de caña panelera (*Saccharum officinarum*). Se emplea tradicionalmente con fines edulcorantes o como producto listo para consumo. Este alimento es valorado dentro de las tendencias actuales de mercado orgánico por su elevado aporte de energía y su apreciable contribución a la seguridad alimentaria de los pueblos. El principal constituyente de la panela es la sacarosa, aunque en su composición también se destaca la presencia de glucosa y fructosa, vitaminas A, C, D, E y B, y minerales como calcio, hierro, potasio, fósforo, magnesio, zinc y manganeso.

La agroindustria panelera reviste gran importancia para la economía colombiana, puesto que ocupa el segundo renglón en la oferta de empleo en el sector agrícola. A nivel mundial, Colombia tiene el mayor consumo per cápita de panela (22 kg al

año) y es el segundo productor después de la India, con una captación del 12 % del mercado global (Superintendencia de Industria y Comercio, 2012; Revista Dinero, 2014). Desde esta perspectiva, la producción de panela en Colombia es considerada la segunda agroindustria rural después del café, gracias al número de establecimientos productivos, el área sembrada en el territorio nacional, la mano de obra vinculada y el potencial de expansión y penetración exhibido en la última década.

La fabricación de derivados de caña panelera se realiza por métodos y herramientas tradicionales en instalaciones comúnmente llamadas trapiches. Muchos estudios evidencian la escasa evolución de dichos procesos y herramientas en el tiempo. El proceso de fabricación de la panela inicia con la compresión de la caña de azúcar por medio de un molino para la extracción de sus jugos. Posteriormente, los jugos son filtrados, purificados y clarificados. Cuando se han retirado los contaminantes de los líquidos, se procede a la evaporación y concentración de los jugos en una serie de recipientes o fondos metálicos, usando el bagazo residual de la molienda como material combustible. La determinación de la cantidad de azúcares, la consistencia y el tiempo de calentamiento adecuados se hacen de manera empírica; un trabajador experto observa el estado de las mieles calientes, y deduce exactamente el punto en el cual se puede terminar el producto. Finalmente, el concentrado se saca de los fondos y se pasa a un recipiente de batido; se moldea y se empaca la panela como producto final. Es común que se obtengan a través de este proceso otros derivados de bastante interés industrial y comercial, como panela pulverizada, mieles y elementos de dulcería.

El conjunto de elementos donde se lleva a cabo la transferencia de energía térmica —entre los gases de combustión y el jugo de caña— con el fin de concentrar el jugo de caña hasta una cantidad final de sólidos entre 88 - 94 °Brix, recibe el nombre de **hornilla panelera**. Esta hornilla, se compone de la zona de alimentación de bagazo, la cámara de combustión, el túnel de circulación de gases, el conjunto de fondos o pailas (que hacen las veces de intercambiadores de calor) y la chimenea empalmada al final del ducto. La ineficiencia energética en las hornillas paneleras tradicionales representa un grave inconveniente en el proceso de fabricación de panela y sus derivados. La salida de gases calientes por chimenea, así como la deficiente combustión y la baja transferencia de calor a través del sistema,

disminuyen la cantidad de unidades producidas en el tiempo y afectan la autosuficiencia combustible. Lo anterior causa que en muchas ocasiones se empleen llantas, plásticos y/o guadua para la combustión en el proceso, con las consecuentes implicaciones ambientales.

La chimenea es un conducto vertical que empalma con la hornilla al final del ducto, y que tiene como función producir la succión de aire necesaria para quemar el combustible y generar el tiro requerido para transportar los gases a través de la hornilla con la velocidad adecuada. Cuando los gases salen demasiado rápido representan pérdida de energía térmica, afectando a su vez las condiciones ambientales del área donde se ubica el trapiche panelero. La temperatura en la chimenea debe permanecer entre 450 - 700 °C para mantener alta la eficiencia energética de la hornilla. Las pérdidas energéticas por chimeneas constituyen el 70 - 90 % de las pérdidas totales; si este valor se reduce a un nivel cerca al 30 %, se podría alcanzar un aprovechamiento energético medio del 20 - 25%.

Castellanos et al. (2010), a través del documento *Agenda prospectiva de investigación y desarrollo tecnológico para la cadena productiva de la panela y su agroindustria en Colombia*¹, relacionan algunos estudios enfocados en el control y ajuste de la molienda, la pre limpieza por gravedad, la clarificación química o física, el uso de diferentes configuraciones de la hornilla y de la cámara de combustión, así como en la investigación de materiales alternativos que se han desarrollado para solucionar el problema. Sin embargo, el sistema productivo de panela y sus derivados continúa siendo tradicional, pues la mayoría de estas investigaciones y desarrollos tecnológicos no se transfieren hasta los productores, asociaciones y fabricantes. Algunas investigaciones relacionan al vapor como medio calefactor (Osorio et al., 2010, *Evaluación térmica y validación de un modelo por métodos computacionales para la hornilla panelera GP150*), uso de evaporadores en estaciones de múltiple efecto (Solís et al., 2006, *Descripción de un proceso tecnificado para la elaboración de piloncillo a partir de caña de azúcar*), configuraciones en contra flujo y flujo combinado (Quezada, 2007, *Guía técnica de la agroindustria panelera*), así como la implementación de diferentes diseños para

¹ El documento se puede encontrar en el siguiente enlace, consultado el 15 de mayo de 2018:
<https://sioc.minagricultura.gov.co/Panela/Documentos/005%20-%20Documentos%20Técnicos/005%20-%20D.T%20-%20Agenda%20Prospectiva.pdf>

las cámaras de combustión tipo CIMPA (Soler y Gómez, 2004, *Determinación de los parámetros de diseño y operación de cámaras de combustión tipo WARD - CIMPA y PLANA - CIMPA en hornillas paneleras*).

Teniendo en cuenta lo anterior, se debe encontrar una alternativa tecnológica para el aprovechamiento de los gases de combustión salientes de la chimenea, ya que representan un medio calefactor potencial para otras actividades de importancia, como la clarificación, el secado del bagazo y el abastecimiento de agua o jugos a altas temperaturas. Además, es necesario alcanzar la autosuficiencia combustible en los trapiches y aumentar consecuentemente la eficiencia energética global del proceso, de manera que se reduzca el impacto ambiental y se logre que el sistema productivo genere una mayor rentabilidad y se puedan utilizar las materias primas adicionales, como el bagazo, en otras operaciones tecnológicas de mayor valor agregado. Todo esto se puede lograr empleando conceptos de integración energética, que consiste en el uso de la energía disponible que acompaña a las corrientes de salida del proceso, para ser utilizados en otras etapas de transformación al interior de este. La energía disponible y útil de dichos flujos puede ser determinada a través de los balances de materia, energía y exergía, y con estos, definir la posibilidad de que las salidas pueden entregar energía para otras operaciones de interés.

En el estado del arte se reportan algunas tecnologías asociadas con integración energética. Entre ellas se encuentra el documento "*Optimización del proceso de combustión en hornillas paneleras en el departamento de Cundinamarca a través de la implementación de un sistema de dosificación de bagazo y recuperación del calor residual*"² donde se emplean gases para precalentar el aire secundario de combustión. El aire se transporta al interior de la hornilla, pasando por el ducto hasta la cámara de combustión. Para ello, se utiliza un ventilador y un sistema de tuberías, a través del cual circula aire y no gases de chimenea. En esta propuesta no se aprovechan los gases salientes de la chimenea. Se utiliza el calor que llevan antes de abandonar la hornilla. Otra tecnología reportada en Colombia es el

² Cfr. http://infoagro.net/archivos_Infoagro/Infotec/biblioteca/ES_AF_web_energiaencade.pdf, <http://slideplayer.es/slide/10326355/>, consultados el 15 de mayo de 2018

trapiche tipo *GIPUN*³. Es una hornilla en contraflujo, que mejora el diferencial de temperatura entre los gases y los guarapos. Además, emplea fondos con aletas, empotrados directamente en la hornilla panelera principal. Se encuentra también reportado un desarrollo tecnológico denominado *"Trapiche no convencional con cámara de combustión tipo WARD CIMPA"*⁴, que consiste en una cámara de combustión con dos entradas independientes de aire (primario y secundario). Este se utiliza para el pre-secado del bagazo, con una reducción de las pérdidas de energía por chimenea de hasta un 23%.

Algunas patentes enseñan mecanismos de aprovechamiento energético, tales como CO 11165331 –en el cual se utilizan gases de combustión para calentar aire al interior de la hornilla—, CO 11008061 –donde se emplea el calor que acompaña al vapor proveniente de las turbinas de generación de energía eléctrica para calentar mostos o jugos crudos—, DE 3225926 –que emplea gases de escape para precalentar agua de caldera—, JP 2010270962 –la cual cuenta con una bobina tipo serpentín al interior de la chimenea de las calderas por donde circula agua para recuperar parte del calor que poseen los gases de salida—, o DE 3010343 –que cuenta con un sistema para el enfriamiento de los gases de combustión que salen de las chimeneas—.

A pesar de lo revelado, es necesario proponer y configurar equipos que empleen de una forma eficiente los gases de chimenea de las hornillas paneleras como fuente de calor, aprovechando su energía útil en alguna operación que integre el proceso.

Descripción detallada de la invención

La hornilla panelera tradicional es un sistema donde se lleva a cabo la conversión del jugo de caña en panela por evaporación, mediante la transformación de la energía del combustible en energía calórica. La forma y el tamaño de una hornilla

³ Cfr. <http://biblioteca.ucp.edu.co/ojs/index.php/paginas/article/view/267> consultado el 15 de mayo de 2018

⁴ https://www.researchgate.net/publication/306023194_Ajuste_de_un_modelo_matematico_para_la_combustion_de_bagazo_de_cana_en_una_camara_Ward-Cimpa Consultado el 15 de mayo de 2018

panelera varían mucho de una región productora a otra, pero en general puede decirse que se compone de una cámara de combustión, un ducto de humos —que provienen de la quema controlada de combustible y llegan a los intercambiadores de calor—, las pailas de concentración y una chimenea para evacuación de gases.

La presente invención se relaciona con un mecanismo para el aprovechamiento de los excesos energéticos en hornillas paneleras tradicionales, que utiliza eficientemente la energía disponible de los gases de chimenea de la hornilla panelera, y que incluye las siguientes partes:

Elementos incorporados en la chimenea de la hornilla (100)

Tobera para captación de gases calientes (150). Fabricada en acero o cualquier otro material resistente al desgaste mecánico y a la temperatura, su forma geométrica se adapta a la salida de la chimenea principal de la hornilla (100), y tiene la función de captar la totalidad de los gases de combustión y aumentar su velocidad local. Instalada en la cima de la chimenea principal (100).

Dámper (160). Luego de la tobera (150), se instala un dámper. Este elemento se utiliza para controlar la cantidad de gases a ser recuperados, los cuales serán usados como corriente caliente para precalentar los jugos de caña. El dámper puede ser una válvula tipo mariposa, o cualquier otro tipo de instrumento que permita controlar el porcentaje en volumen de gases que se dispondrán al ambiente, así como la cantidad de gases que se recircularán en el sistema para realizar las operaciones de precalentamiento. Puede construirse en acero inoxidable o en cualquier material resistente a la temperatura y la corrosión.

Tubería para transporte de gases (200)

Una primera tubería para el transporte de gases (200) conecta la cima de la chimenea principal (100) y la entrada del tanque de precalentamiento (300). Normalmente se puede construir en acero al carbono de 4 pulgadas de diámetro o más. Tiene incorporados un termómetro —de cualquier tipo, incluyendo los de tipo carátula o digital— y un medidor de flujo para determinar la caída de presión y la velocidad de los gases calientes que serán conducidos. La tubería se aísla

utilizando cualquier tipo de material normalmente empleado en el arte –lana de vidrio, poliéster, tela roca, entre otros—.

Tanque de precalentamiento tipo marmita (300)

La tubería (200) capta los gases calientes que salen de la chimenea de la hornilla (100) y los conduce a un tanque tipo marmita (300), el cual precalienta los jugos de caña. Normalmente dicho precalentamiento se da a temperaturas entre 35 y 60 °C, logrando que los guarapos que ingresan a la hornilla lo hagan a una mayor temperatura, alcanzando casi el punto de clarificación.

El tanque de precalentamiento está conformado por un cilindro hueco (310), unido en su parte inferior a un elemento cónico hueco (320) que termina en forma de una tubería (330); esta tubería sirve para sacar el jugo de caña concentrado. En la parte superior del tanque se ubica una falca (370), que, como lo define la RAE, es un cerco que se pone como suplemento a las pailas. La falca permite el ascenso de los jugos en casos eventuales. Más específicamente, con relación al tanque de precalentamiento:

- El cilindro hueco (310) está unido en su parte inferior al elemento cónico hueco (320), donde la sección transversal más amplía del elemento cónico coincide exactamente con la sección transversal del cilindro hueco.
- La sección transversal de la tubería para salida de jugo (330) coincide exactamente con la sección transversal más pequeña del elemento cónico hueco (320). La tubería posee una válvula incorporada para el control del flujo de guarapo.
- La parte exterior del cilindro hueco cuenta con unas aletas de intercambio de calor (350), que posibilitan una transferencia de calor más eficiente.
- El tanque posee una camisa (380) que envuelve totalmente las aletas (350), así como la parte exterior del cilindro hueco (310) y la parte exterior del elemento cónico hueco (320), exceptuando la tubería que sale dicho elemento cónico (330).
- El tanque posee una tubería para ingreso de agua y lavado de la chaqueta (340), conectada directamente a la camisa (380) en la zona ubicada sobre el cilindro hueco (310). Dicha tubería incluye una válvula de control.

- El tanque posee una tubería para salida de agua de lavado (345), conectada en la parte de la camisa (380) ubicada sobre el elemento cónico (320) (zona inferior del tanque). La tubería incluye una válvula de control.
- La camisa tiene conectada una tubería para entrada de gases de combustión (360), que cuenta con su respectiva válvula de control. Este mecanismo se encuentra en la parte inferior de la chaqueta, ubicado sobre el elemento cónico (320).
- La camisa cuenta también con una tubería para salida de gases de combustión (365) con su respectiva válvula de control, tubería que se encuentra sobre la parte superior de la camisa ubicada sobre el cilindro hueco (310).

Tubería de conexión (500)

Transporta los gases que salen del tanque de precalentamiento (300) hacia la segunda chimenea o chimenea secundaria (600). Incluye un *venturi* (510) que produce un efecto de impulsión adicional sobre los gases que circulan en la línea. Los gases entran en contacto directo con el aire que sale del soplador, el cual pasa previamente por el *venturi* adquiriendo gran velocidad. La formación de una presión negativa a la salida del dispositivo promueve la succión de los gases de combustión, acelerando considerablemente la salida de los gases por la chimenea. Este equipo permite la utilización del denominado efecto *venturi*; empleado tradicionalmente en aplicaciones de hidráulica, neumática y motores de combustión.

Conjunto de *venturi* (510) y motor soplador (400)

Un *venturi* (510) se ubica en la salida de gases del tanque de precalentamiento (365), justo en la base de la chimenea secundaria (600). La entrada de mayor diámetro del *venturi* (510) está conectada al motor soplador (400), de tal forma que el flujo de aire a alta velocidad cree una presión negativa sobre la salida del *venturi* (510), entregando cantidad de movimiento a los gases que pasan a través del tanque de precalentamiento (300). De esta manera, se consigue que los gases derivados de la chimenea principal (100) adquieran mayor velocidad y entreguen

de forma más eficiente el calor a los jugos de caña o al fluido que debe ser precalentado. Otra función del conjunto *venturi* (510) – soplador (400) es mantener el tiraje adecuado de la chimenea principal (100), maximizando el rendimiento del fenómeno de combustión, evitando que los gases captados se estanquen en la línea de conducción (200) y provoquen una disminución de la eficiencia energética de la hornilla o una caída importante en la temperatura de los gases de combustión.

Chimenea secundaria (600)

El mecanismo de la presente invención incorpora una segunda chimenea (600), a través de la cual se evacúan los gases de combustión que ceden parte de su energía en el tanque de precalentamiento (300).

La presente invención emplea los excesos de energía útil (exergía) provenientes de los gases de la chimenea de la hornilla, para aumentar los índices de eficiencia y productividad del proceso de transformación. Asimismo, disminuye los indicadores de impacto ambiental, mejorando las condiciones del entorno laboral en los trapiches.

Resumen de las figuras

La Figura 1 relaciona un mecanismo para el aprovechamiento de los excesos de energía en hornillas paneleras. Los numerales corresponden a:

(100) Chimenea principal.

(150) Tobera para captación de gases.

(160) Dámper o válvula de regulación de flujo recirculado.

(200) Línea de tubería para el transporte de gases.

(300) Tanque para precalentamiento de jugos.

(400) Ventilador o motor soplador.

(500) Tubería de conexión entre el tanque, el soplador y la chimenea secundaria.

(510) Dispositivo *venturi*.

(600) Chimenea secundaria.

La Figura 2 relaciona el tanque de precalentamiento objeto de la presente invención. Los numerales corresponden a:

(300) Tanque para precalentamiento de jugos.

(310) Cilindro hueco (repositorio para el fluido a precalentar).

(320) Elemento cónico hueco.

(330) Tubería para salida de jugo de caña precalentado.

(340) Tubería para ingreso de agua de lavado en la camisa.

(345) Tubería para salida del agua de lavado proveniente de la camisa.

(350) Conjunto de aletas anulares.

(360) Tubería para entrada de los gases de combustión a la camisa.

(365) Tubería para evacuación de gases.

(370) Falca.

(380) Camisa o chaqueta.

Formas de llevar a cabo la invención

El mecanismo propuesto se validó modificando una hornilla real con capacidad de 300 kg/h de jugo, fabricando diferentes lotes de panela y sus derivados: miel de caña, panela en bloque y panela pulverizada. Se llevaron a cabo 15 experimentos completos, que siguieron las condiciones del proceso de transformación. Los resultados se interpretaron a través del uso de herramientas estadísticas, implementando pruebas ANOVA, test de múltiples rangos de Tukey y algoritmos de optimización y análisis de sensibilidad. Se encontró que la eficiencia energética del proceso, definida como la razón entre la energía aprovechada y la energía que

ingresa al sistema, aumentó en promedio un 32 % al operarse con un 80 % de recirculación de los gases de chimenea. Se redujo la pérdida de energía a través de la chimenea en un 24 %. De igual forma, la productividad del proceso, establecida como kg por hora de panela elaborada, se incrementó en un 83 %. Además, se duplicó el rendimiento de la operación, concebido como kg de panela producida/ kg de bagazo usado. Finalmente, se alcanzó la autosuficiencia combustible del módulo panelero. Los indicadores de potencial de impacto ambiental, evaluados por la metodología WAR GUI, mostraron una disminución entre el 47 % y 80 % para: afectación de ecosistemas terrestres, daño a fuentes de agua, calentamiento global y potencial de acidificación. Además, se evidenció una erradicación en la producción de Monóxido de Carbono y Dióxido de Azufre, y una gran reducción en la disposición de Óxidos de Nitrógeno.