

Capítulo 11

Sistema experto para el diseño de hornillas térmicamente eficientes (HornillApp)

Henry Alberto Hernández Martínez, Oscar Andrés Mendieta Menjura, Paula Helena Reyes Herrera, John Javier Espitia González, Fabián Andrés Velásquez Ayala, Luz Esperanza Prada Forero y Jader Rodríguez Cortina

Resumen

En Colombia existen cerca de 20.000 unidades productoras de panela (UPP), u hornillas, pero no se ha determinado una cifra exacta sobre cuántas han sido construidas con un criterio técnico especializado (Invima, 2015). No obstante, las UPP construidas sin un criterio técnico no son sistemas autosuficientes y requieren el uso de combustibles diferentes al bagazo (leña, caucho o carbón) para suplir las demandas energéticas del proceso, lo cual se ve reflejado en el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero y de los costos de producción del producto. Por lo tanto, este capítulo presenta una solución parcial a esta problemática, con una aplicación de uso libre para el diseño automatizado de UPP, titulada HornillApp, la cual elimina el costo del estudio de diseño de construcción de una hornilla panelera.

La aplicación HornillApp se modeló con cuatro componentes a nivel computacional: 1. una interfaz gráfica que le permite al usuario ingresar datos del sistema productivo y recibir un reporte con el resultado; 2. un modelo de cero dimensiones (modelo OD) que permite encontrar las dimensiones de la chimenea, el ducto y la cámara de combustión, de acuerdo con el sistema productivo, para optimizar la eficiencia térmica y reducir el impacto ambiental; 3. una base de datos con información necesaria para los modelos

computacionales, los costos de los componentes y los datos históricos del precio de la panela; y 4. una rutina que, a partir del diseño semidetallado, estima un costo económico y realiza una proyección económica con el tiempo de retorno de la inversión. Vale la pena resaltar que el modelo OD incorporado a la herramienta es un trabajo previo cuyos resultados se basan en simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) y una validación en campo con datos de siete hornillas (Espitia et al., 2020).

Una de las ventajas de HornillAppes que es gratuita; esta se publicó en julio de 2021 y después de un año de funcionamiento recibió cerca de 5.000 visitas, de las cuales el 88 % fue en Colombia. Además, esta aplicación se convierte en un canal de transferencia de conocimiento sobre la construcción de hornillas a productores paneleros, ya que entrega una proyección económica que les permite evaluar la viabilidad de adoptar este tipo de tecnología.

Palabras clave: modelo computacional, algoritmos de optimización, hornilla panelera

Introducción

En las unidades productoras de panela, comúnmente conocidas en Colombia como “trapiches”, se extrae y procesa el jugo de los tallos de la caña de azúcar para obtener panela. La mayoría de los trapiches cuentan con una hornilla, en la cual se transforma la energía del bagazo en energía calórica, que se transfiere a través de unos intercambiadores de calor al jugo para su concentración en sistemas de evaporación abierta (Rodríguez et al., 2018). Una hornilla está conformada por una cámara de combustión, un ducto, una chimenea y un tren de intercambiadores de calor (pailas). Las pailas tienen diferentes geometrías (planas, pirotubulares, acanaladas, semiesféricas y semicilíndricas, con o sin aletas) y cuentan con falcas, como sistema de seguridad para evitar accidentes en la zona de trabajo. La capacidad de producción de las hornillas puede variar desde 75 hasta 225 kg de panela/h, y estas

pueden operar con bagazo verde o seco, según el tipo de cámara (Ward o plana, respectivamente) (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [AGROSAVIA], s. f.; Velásquez et al., 2021).

Teniendo en cuenta lo anterior, AGROSAVIA desarrolló dos variantes de hornilla con el fin de mejorar algunos aspectos del proceso de producción panelera tradicional. La primera es la hornilla tipo Cimpa, que modifica la cámara de combustión para mejorar la eficiencia térmica global. La segunda es el modelo de evaporación híbrido para hornillas, que introduce un recuperador de calor para incrementar la eficiencia térmica y la capacidad de producción. Este recuperador es un sistema acuotubular que aprovecha la energía residual de los gases de combustión en la chimenea para generar vapor y retornarlo al proceso (AGROSAVIA, s. f., 2021).

En todos los casos, los artefactos que componen la hornilla son conjuntos de elementos que requieren un estudio para garantizar un funcionamiento apropiado. Estos estudios son realizados por personas especializadas en el proceso y con conocimientos de ingeniería, lo que incrementa el costo de construcción hasta en un 20 %. Por lo tanto, la tendencia de producir panela en hornillas construidas sin un criterio técnico confiable disminuye la posibilidad del productor panelero de ser competitivo en el mercado regional (Ferrer Cruz et al., 2013). Asimismo, las hornillas construidas sin un criterio técnico apropiado tienen una baja eficiencia térmica global (energía aprovechada/energía suministrada), requieren combustibles adicionales al bagazo para suplir las demandas energéticas del proceso (leña, caucho o carbón), producen altas emisiones de gases de efecto invernadero, alteran la calidad de la panela y disminuyen la rentabilidad o utilidad del agronegocio (Ferrer Cruz et al., 2013; Hernández Restrepo, 2004; Jagannadha Rao et al., 2009; La Madrid et al., 2016; Soler Villamizar & Gómez Tovar, 2004; Tarazona Parra, 2011).

El diseño de hornillas ha sido estudiado desde los años ochenta para mejorar la eficiencia térmica y, así, aumentar tanto la producción de panela como la construcción de hornillas con

estudios técnicos. Entre las contribuciones más sobresalientes, se encuentran el diseño basado en resultados de simulaciones termodinámicas de la combustión del bagazo (García & Sánchez, 2007); el modelo matemático que describe el funcionamiento de una cámara Ward-Cimpa (Castillo et al., 2004; Prada Forero et al., 2012; Sánchez Castro et al., 2013); la herramienta Dr Horpa, que determina el tamaño de la hornilla y el molino según las condiciones del cultivo de caña de azúcar (AGROSAVIA, s.f.; Camacho & Núñez, 2012), y el modelo de cero dimensiones (OD), que corrige las dimensiones y la geometría de las pailas en función de la capacidad de la hornilla, para lograr la autosuficiencia energética (Espitia et al., 2020; Velásquez et al., 2021). En 2018, AGROSAVIA, con la financiación del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR), en el marco del proyecto “Estrategias de proceso para mejorar la inocuidad y calidad de la panela”, inició el desarrollo de una aplicación llamada Sistema Experto (SE) para facilitar el diseño de hornillas tipo Cimpa térmicamente eficientes, bajo los parámetros técnicos apropiados, dirigida a usuarios sin conocimiento de ingeniería especializada.

La incorporación del SE (HornillApp) en el sector productivo panelero reduce la brecha entre el sector agrícola y las tecnologías de la información. Por lo tanto, este capítulo presenta la contribución realizada por AGROSAVIA con su aplicación HornillApp: una herramienta basada en *software* compuesta por un algoritmo de aprendizaje computacional y una interfaz gráfica amigable con el usuario (Velásquez et al., 2021).

Metodología

HornillApp se desarrolló en tres etapas: 1) construcción del algoritmo para sistematizar las tareas de diseño de ingeniería, 2) definición de los requerimientos computacionales y 3) programación, validación y despliegue de la aplicación en un servidor.

En la primera etapa se definió la arquitectura de la aplicación para su desarrollo, la forma de acondicionar los modelos matemáticos en términos del lenguaje de programación y las propiedades de los materiales de construcción de la hornilla para modelar la propuesta de valor. En la segunda etapa se seleccionó el lenguaje de programación teniendo en cuenta características como la versatilidad, la complejidad, el acceso y el tipo de licencia, lo que permitió el desarrollo de librerías y componentes necesarios para consolidar la aplicación. En la tercera etapa, la aplicación se desplegó en un servidor de desarrollo, antes de realizar la instalación en el servidor corporativo de AGROSAVIA y compartir la aplicación al público. Vale la pena resaltar que la validación de HornillApp se realizó con personal técnico experto en el diseño de hornillas y con productores paneleros, quienes compararon los resultados de la aplicación con mediciones hechas en hornillas reales (Espitia et al., 2020; Velásquez et al., 2021); con base en esto, se definió la información básica que se solicita al usuario en la interfaz gráfica, la cantidad de diagramas mecánicos y la forma de presentarlos, y el valor de los materiales de construcción en el mercado local y de los insumos para la puesta en servicio de la unidad productora de panela (UPP).

Una vez establecidos los parámetros del desarrollo en las etapas uno y dos, se definió HornillApp como una aplicación de uso libre y gratuito que presenta estudios de factibilidad para la construcción de hornillas paneleras ecoeficientes tipo Cimpa. Los estudios se generan con base en los cálculos aproximados realizados por una rutina de diseño fundamentada en el modelo OD (Espitia et al., 2020; Velásquez et al., 2021), así como en información de bases de datos y del usuario, para dimensionar los componentes de la hornilla y estimar su valor comercial de implementación. Por lo tanto, la aplicación HornillApp se dividió en tres partes: el núcleo, el sistema de información y la interfaz gráfica.

Por un lado, el núcleo y el sistema de información son estructuras del programa que gestionan la información de las bases de datos, a partir de los resultados obtenidos con algunos modelos matemáticos,

para dimensionar y tasar los elementos que conforman la hornilla (Espitia et al., 2020; Velásquez et al., 2021). Por otro, la interfaz gráfica presenta el estudio de factibilidad en varias secciones, para facilitar la comprensión por parte del usuario final.

El ambiente gráfico de la interfaz se implementó usando hojas de estilo tomadas de Bootstrap, y se programó en lenguaje HTML 5, para su visualización en computadores y dispositivos móviles. En la visualización, se presenta la información con formularios interactivos hechos con JavaScript para asignar valores iniciales a los modelos matemáticos del núcleo y gestionar el sistema de información desde la interfaz de usuario. Las funciones nativas, como asignar valores iniciales o gestionar la base de datos, son rutinas que se ejecutan en segundo plano para automatizar el diseño de la hornilla. Además, las rutinas automatizadas son estructuras de código programadas en lenguaje Python y SQL, para facilitar el desarrollo de la aplicación.

Una de las estructuras visibles diseñada en Python es la proyección económica, que se estima en segundo plano y refleja los resultados en la interfaz gráfica mediante un informe que puede descargarse por el usuario. La presentación de los resultados inicia con el valor aproximado de implementación de la hornilla, que se estima a partir de los valores comerciales de los elementos de construcción y la mano de obra recopilados del comercio local (estos valores se actualizan cada seis meses). Luego, el valor de implementación se convierte en el valor inicial de los algoritmos que determinan la depreciación del equipo (utilizando el método de línea recta) y que establecen una métrica del tiempo de retorno de la inversión (Chu Rubio, 2021).

Otra característica de la estructura de código desarrollada es que determina la cantidad de usuarios y los lugares del mundo desde los cuales se ha visitado la página para utilizar la aplicación. Las cantidades se estiman utilizando una herramienta diseñada por Google llamada Google Analytics, que es una herramienta de análisis y seguimiento de visitas a sitios web.

Resultados y discusión

El desarrollo de HornillApp incluyó dos componentes principales (figura 11.1): el núcleo y el sistema de información. Por un lado, el núcleo de la aplicación se fundamentó en el modelo OD, que incorpora un algoritmo de optimización para estimar las dimensiones de las pailas a partir de la cantidad de jugo que se va a procesar en cada una de ellas. Por otro lado, el sistema de información se encarga de procesar la información usando un modelo de red neuronal.

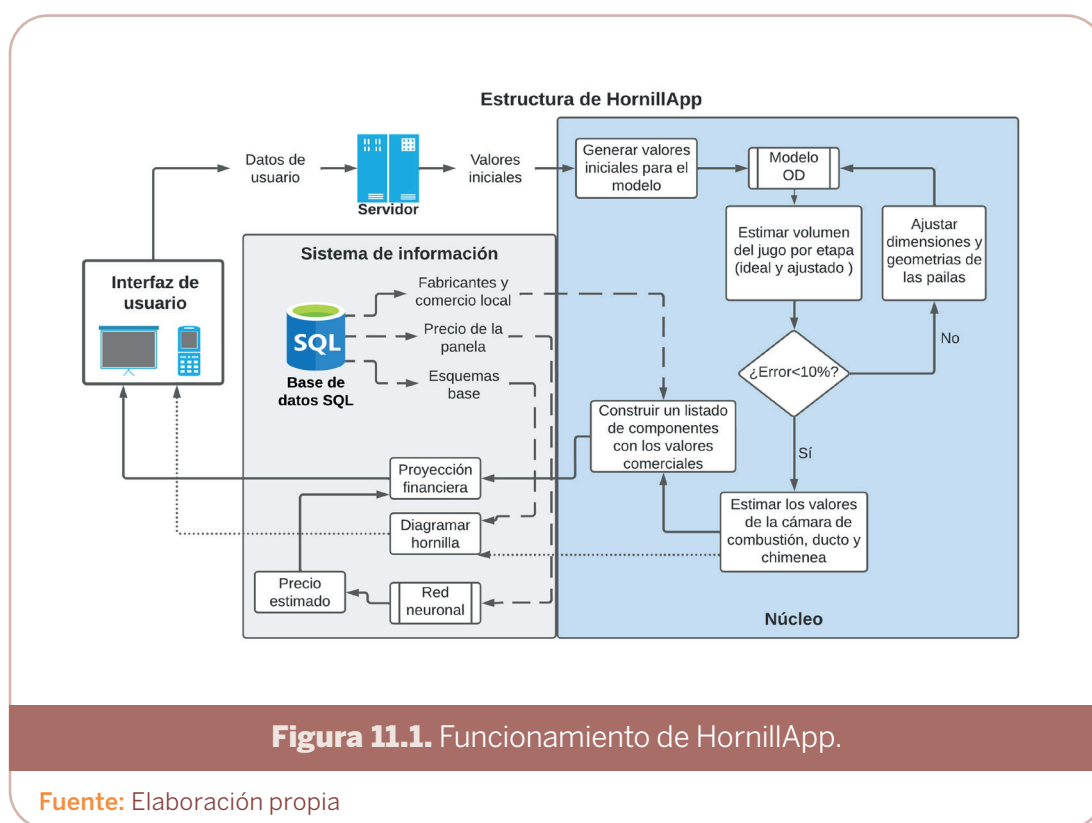
Núcleo de la aplicación

La interfaz de usuario provee un formulario para registrar información personal del usuario y características básicas del cultivo de caña de azúcar. Por un lado, la información personal comprende nombre o razón social, correo electrónico de contacto, teléfono y ubicación. Por otro, la información básica del cultivo contempla características como área cultivada, altura sobre el nivel del mar, periodo vegetativo y rendimiento de la caña, periodicidad de la molienda y tipo de cámara de combustión. Asimismo, la aplicación cuenta con un manual de usuario, disponible para su descarga en la página principal.

Como se observa en la figura 11.1, la información del formulario pasa de la interfaz del usuario al servidor y es usada para determinar parámetros como la capacidad de producción, el volumen de jugo en condiciones ideales, el bagazo producido, la cantidad de pailas y el tipo de cámara de combustión. Luego, el volumen de jugo en condiciones ideales se divide en función de la cantidad de pailas y etapas del proceso.

Una vez definida la cantidad de pailas y el volumen de jugo por etapa, la aplicación genera una configuración de pailas con dimensiones y geometrías arbitrarias e inicia el proceso de optimización de forma iterativa. Asimismo, el modelo OD estima el volumen de jugo que se procesa en cada etapa en función de las geometrías

y dimensiones generadas de forma arbitraria y lo compara con el volumen de jugo en condiciones ideales, para establecer un margen de error. Los datos del modelo OD se utilizan para recalcular iterativamente el volumen de jugo en cada paila, para minimizar el error (menor al 10 %). Cuando el proceso termina, la aplicación estima las dimensiones del ducto en función del tamaño de las pailas, la cámara de combustión y la chimenea.



Sistema de información

La aplicación cuenta con un conjunto de bases de datos que contienen información de los usuarios que usan la aplicación o de consulta para la generación del resultado, como las características de la caña de azúcar (rendimiento y contenido de fibra en función de la variedad) y los precios del comercio local de panela y de los materiales que conforman la hornilla. La información de

los usuarios es almacenada cuando finaliza la rutina del diseño de la hornilla. Luego, la aplicación genera un archivo que vincula el resultado obtenido con la información personal del usuario y se almacena en el servidor.

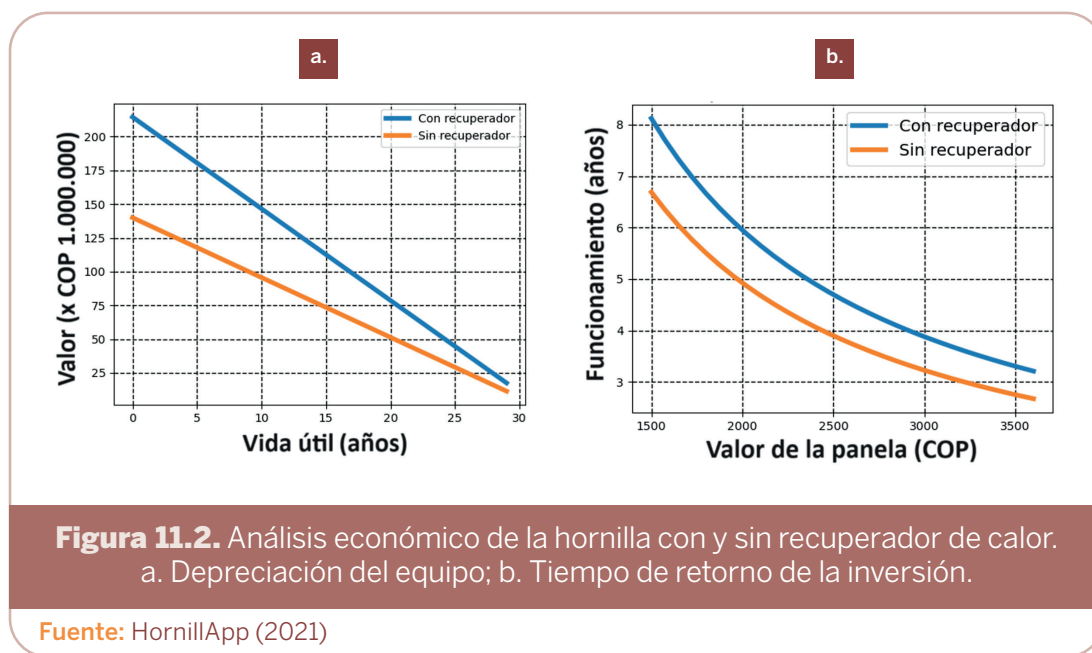
Por otro lado, la información de consulta para generar el resultado se usa en dos momentos durante el diseño de la hornilla. El primer momento es cuando la aplicación lista los materiales de construcción y asocia a ellos un costo. El segundo momento es cuando se realiza la proyección económica, realizada con base en el precio de la panela (que estima el flujo de caja), el tiempo de retorno de la inversión y la depreciación de la hornilla. No obstante, el valor de la panela se determina con una red neuronal entrenada con información histórica del precio de la panela registrado del comercio local (Orjuela Castro & Chavarrio Colmenares, 2011).

Como se observa en la figura 11.1, el sistema de información y el núcleo se ejecutan en la aplicación de forma secuencial; es decir, termina un proceso e inicia otro. Por lo tanto, las características mínimas que necesita el servidor para reducir el tiempo de espera del usuario y ejecutar la aplicación son las siguientes: capacidad de almacenamiento de 1,5 GB disponibles al mes (90 GB durante cinco años para asegurar un funcionamiento continuo, un respaldo con copias de seguridad y la generación de cerca de 20.000 propuestas de valor), 32 GB de memoria RAM, sistema operativo Linux y disponibilidad de cien consultas simultáneas.

Proyección económica

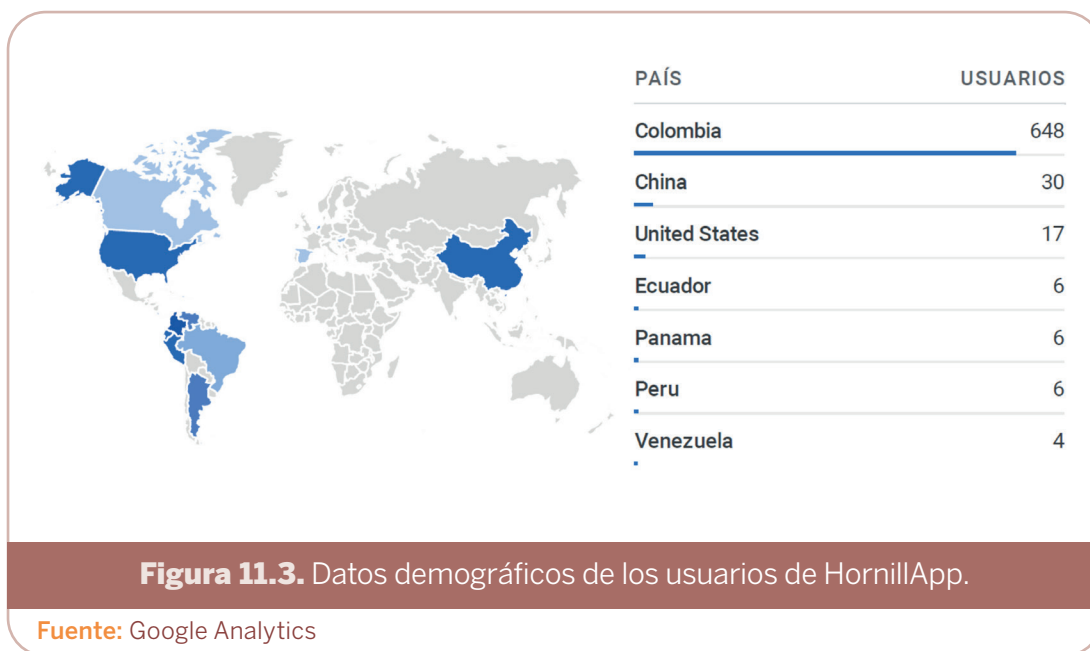
La aplicación presenta los resultados de la proyección económica a través de gráficas, como se muestra en la figura 11.2. En este ejemplo, se muestra la información resultante de generar una propuesta de valor para una hornilla de 75 kg de panela/h, cámara plana, eficiencia del 40 % y disponibilidad de 40 ha de caña de azúcar, con un periodo vegetativo de 18 meses. Teniendo en cuenta las características de la hornilla, la aplicación genera dos gráficas: una, con la información de la tendencia económica de

una hornilla tipo Cimpa (color naranja), y otra, con la proyección de una hornilla con sistema recuperador de calor (color azul). Estas gráficas presentan características como la depreciación de la hornilla (figura 11.2a) y el tiempo de retorno de la inversión (figura 11.2b).



Adopción de HornillApp

La aplicación fue dispuesta por AGROSAVIA para uso general de los usuarios el 15 de julio de 2021. El uso de la aplicación se midió utilizando una API (*application programming interface*) de Google llamada Google Analytics, que se encarga de establecer el número de usuarios que han visitado el sitio web y su ubicación geográfica. La API registró información durante los primeros seis meses de funcionamiento de HornillApp y determinó que fue consultada por alrededor de 5.000 usuarios en todo el mundo; el 88 % de los visitantes eran de Colombia (figura 11.3).



Finalmente, algunas aplicaciones similares a HornillApp inician con simulaciones termodinámicas de la combustión del bagazo de caña a diferentes humedades y sistematizan el proceso de diseño con un sistema de archivos y ventanas desarrolladas en Visual Basic 4 y Windows 95 (Castillo et al., 2004). Luego está la herramienta Dr Horpa, que presenta dos niveles de operación: uno que le permite al usuario determinar el tamaño de la hornilla, y otro que le permite al técnico especializado en diseño de hornillas dimensionar las partes de la hornilla en función de la transferencia de calor de los gases al proceso (Prada Forero et al., 2012). A diferencia de ellas, HornillApp es una aplicación desarrollada con una interfaz de usuario de alto nivel, intuitiva, multiplataforma y destinada a personas sin conocimientos técnicos o en ingeniería.

Conclusiones

HornillApp es una aplicación de uso libre y gratuito que le permite a un usuario sin conocimientos especializados en ingeniería modelar una solución tecnológica para procesar caña de azúcar

en una hornilla. Esta solución incorpora los planos detallados de las partes de una hornilla tipo Cimpa, una lista de materiales y una proyección de costos para que el usuario evalúe la viabilidad económica de la construcción de la hornilla.

El diseño sistematizado de hornillas paneleras que realiza HornillApp presenta dos ventajas: reduce el tiempo que tarda el diseñador o la empresa que presta el servicio de construcción de hornillas para presentar una propuesta de valor al productor panelero y elimina el costo asociado al estudio de factibilidad económica para la implementación de una hornilla tipo Cimpa.

HornillApp presenta propuestas con valores menores a los conseguidos en el mercado local para la construcción de la hornilla panelera tipo Cimpa, ya que un algoritmo de optimización se encarga de estimar las dimensiones de cada una de las partes de la hornilla en función del área menor requerida para su construcción, de acuerdo con las normas de construcción y seguridad vigentes.

Agradecimientos

Agradecemos a los productores de panela, técnicos, estudiantes, investigadores, entre otros, que nos acompañaron en los seminarios virtuales durante la etapa de lanzamiento de la aplicación HornillApp y expresaron su punto de vista para realizar las mejoras a la interfaz. Asimismo, al MADR por la financiación de los proyectos ejecutados por AGROSAVIA en desarrollo de la agenda de investigación. Los resultados corresponden al proyecto “Estrategias de proceso para mejorar la inocuidad y calidad de la panela”.

Referencias

Camacho, Y. C., & Núñez, K. G. (2012). *Estudio de la influencia del tamaño de partícula y la humedad de combustible sobre el comportamiento de la combustión de bagazo de caña en un horno de lecho fijo* [tesis de grado, Universidad Industrial de Santander].

- Castillo, E. F., García, H. R., & Prato, D. (2004, 29 de septiembre-1.º de octubre). *Desarrollo de un modelo matemático para el proceso de combustión de biomasa en hornos de parrilla estacionaria (tipo: Ward-Cimpa y tradicional mejorada)* [presentación en seminario]. VII Seminario Internacional del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (Simads), Bucaramanga, Colombia.
- Chu Rubio, M. (2021). *El ROI de las decisiones del marketing: un enfoque de rentabilidad*. Editorial UPC.
- Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). (s. f.). Hornillas paneleras ecoeficientes tipo Cimpa. <https://www.agrosavia.co/productos-y-servicios/oferta-tecnol%C3%B3gica/la%C3%ADnea-agr%C3%ADcola/cultivos-transitorios-y-agroindustriales/maquinaria-equipos-instrumentos-y-herramientas/132-hornillas-paneleras-ecoeeficientes-tipo-cimpa>
- Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). (2021, 31 de mayo). Tecnologías de la caña y la panela más cerca del productor. *Agronet*. <https://www.agronet.gov.co/Noticias/Paginas/Tecnolog%C3%ADas-de-la-ca%C3%B1a-y-la-panela-m%C3%A1s-cerca-del-productor.aspx>
- 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>
- Ferrer Cruz, J. E., Moras Sánchez, C. G., Fernández Cueto, M. J., & Álvarez Palafox, C. (2013). Aplicación de simulación para el incremento de la productividad de una empresa generadora de panela en la ciudad de Tuxtepec, Oaxaca. *Revista de la Ingeniería Industrial*, 7(1), 13-20. <https://docplayer.es/29065994-Aplicacion-de-simulacion-para-el-incremento-de-la-productividad-de-una-empresa-generadora-de-panela-en-la-ciudad-de-tuxtepec-oaxaca.html>
- García, C. E., & Sánchez, Z. (2007). *Comparación del desempeño de algoritmos de optimización avanzada en la síntesis óptima de redes de intercambio de calor* [tesis de grado, Universidad Industrial de Santander].
- Hernández Restrepo, R. (2004). *Determinación dinámica de los coeficientes globales de transferencia de calor para las pailas aleteada, redonda, plana, pirotubular y caldera enterrada (semicilíndrica) usadas en la*

- industria panelera* [tesis de grado, Universidad Industrial de Santander]. <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2004/114445.pdf>
- HornillApp. (2021). *HornillApp* [aplicación móvil]. <http://hornillapp.agrosavia.co:7000/>
- Invima. (2015). *Establecimientos inscritos en trapiches paneleros* [Registro Nacional de Trapiches Paneleros].
- Jagannadha Rao, P. V. K., Das, M., & Das, S. K. (2009). Changes in physical and thermo-physical properties of sugarcane, palmyra-palm and date-palm juices at different concentration of sugar. *Journal of Food Engineering*, 90(4), 559-566. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.07.024>
- 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>
- Orjuela Castro, J. A., & Chavarrio Colmenares, I. A. (2011). Caracterización de la cadena de abastecimiento de panela para la provincia de Bajo Magdalena-Cundinamarca. *Ingeniería*, 16(2), 107-124. <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/19759?show=full>
- Prada Forero, L. E., Sánchez Castro, Z., García Bernal, H. R., & Rojas Ávila, H. S. (2012). Hornillas paneleras Ward-Cimpa: validación de los modelos matemáticos de diseño Corpoica-UIS. *Fuentes, El Reventón Energético*, 10(2). <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistafuentes/article/view/3337>
- 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., García Bernal, H. R., & Mendieta Menjura, O. A. (2013). Efecto del precalentamiento del aire primario y la humedad del bagazo de caña de azúcar durante la combustión en lecho fijo. *Revista Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 14(1), 5-16. https://doi.org/10.21930/rcta.vol14_num1_art:263
- Soler Villamizar, J. P., & Gómez Tovar, F. H. (2004). *Determinación de los parámetros de diseño y operación de cámaras de combustión tipo Ward-Cimpa y plana-Cimpa en hornillas paneleras* [tesis de grado, Universidad Industrial de Santander]. <https://docplayer.es/33971712->

Determinacion-de-los-parametros-de-diseno-y-operacion-de-camaras-de-combustion-tipo-ward-cimpa-y-plana-cimpa-en-hornillas-paneleras.html

Tarazona Parra, G. A. (2011). *Manejo fitosanitario del cultivo de la caña panelera: medidas para la temporada invernal*. Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). <https://www.ica.gov.co/getattachment/6a54658e-1723-488d-a7ab-2f4baad793cb/Manejo-fitosanitario-del-cultivo-de-la-cana-panele.aspx>

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>

