



## Diseño de un sistema para el aprovechamiento integral de la cáscara de arroz

### *Design of a system for integral use of the rice husk*

Michel Errasti - Cabrera  
Antonio Werner de Dios – Ortega

Andy Amauri Sánchez – Rodríguez  
Carlos Fernández Aballí-Altamirano

**Recibido:** septiembre de 2013

**Aprobado:** mayo de 2014

#### **Resumen/ Abstract**

El presente trabajo tiene como objetivo realizar el diseño de un horno que permitirá la combustión controlada de la cáscara de arroz para obtener una ceniza con propiedades puzolánicas; el cual es un producto demandado para la elaboración de materiales refractarios y como adición reactiva en los hormigones de altas prestaciones. El estudio estará centrado en la CPA productora de arroz "Eulalio García", donde se pretende aprovechar la energía térmica de los gases de la combustión en distintos procesos agroindustriales. Los resultados muestran que la dimensión volumétrica de la cámara de combustión será de  $0,72 \times 0,72 \times 1,06$  m, mientras que la altura y el diámetro de la chimenea serán de  $6,40$  m y  $0,42$  m, respectivamente. El coeficiente de exceso de aire será de  $1,55$  y el volumen de aire a suministrar  $4,34$  m<sup>3</sup>/kg<sub>CA</sub>. La eficiencia del horno se estimó en  $86,63$  % y el calor útil en  $10585,74$  kJ/kg<sub>CA</sub>.

**Palabras clave:** cáscara de arroz, ceniza puzolánica, combustión controlada, energía térmica, horno.

*The present paper aims to make the design of a furnace that allow controlled burning of rice husk for obtain a pozzolanic ash, which is a product demanded for the production of refractory materials and as an reactive addition in high performance concretes. The study will focus on CPA "Eulalio Garcia", which aims to exploit the thermal energy from the combustion gases in different agro-industrial processes. The results show that the volumetric dimension of the combustion chamber will be  $0.72 \times 0.72 \times 1.06$  m, while the height and diameter of the stack will be of  $6.40$  m and  $0.42$  m, respectively. The excess air ratio will be  $1.55$  and the volume of air to provide  $4.34$  m<sup>3</sup>/kg<sub>CA</sub>. Furnace efficiency was estimated to be  $86.63$  % and useful heat in  $10585.74$  kJ / Kg<sub>CA</sub>.*

**Key words:** rice husk, pozzolanic ash, controlled combustion, thermal energy, furnace.

#### INTRODUCCIÓN

En el marco de la comunidad científica se evidencia una creciente preocupación relacionada con el uso indiscriminado de las fuentes de energía no renovables. El alto poder contaminante, el agotamiento progresivo y los precios ascendentes de los combustibles de vida limitada nos

conducen a la búsqueda de fuentes energéticas más limpias y de carácter renovable. Además de las consideraciones energéticas, hoy se vela por el impacto integral que tiene toda actividad industrial sobre el medioambiente, lo que ha provocado que se hagan más estrictas las diferentes legislaciones medioambientales, dentro de las que se incluye la disposición final de residuos sólidos [1-2].

En el mundo se producen anualmente alrededor de 120 millones de toneladas de cáscara de arroz (CA). Esto determina que la CA sea una de las biomásas disponibles con mayor posibilidad de uso para la generación de energía, sin embargo en la actualidad esta fibra vegetal se encuentra subutilizada. El arroz es un producto agrícola que se cultiva, en mayor o menor medida, en todas las provincias de Cuba. Su producción se localiza en áreas bastante concentradas, asociadas a regiones bajas, con alta presencia de agua y suelos con características particulares. La CA que se obtiene de esta producción queda como un residuo agroindustrial, que por su baja densidad ocupa grandes volúmenes y crea un gran problema a la hora de encontrar dónde depositarlo. Una parte de esta cáscara (menos del 30% del total) es vendida por el Grupo Agro-Industrial Pecuario Arrocerero (GAIIPA) a granjas avícolas que la utilizan como camada para las naves de cría, a un precio de 0,75 CUP/m<sup>3</sup> de CA [2]. Por otra parte, aunque en la producción privada se emplea en cierta medida como adición al pienso para aves y cerdos, se ha demostrado que por su composición química la CA no representa ningún complemento nutritivo para los animales. El resto del volumen es recolectado y quemado al aire libre, generando una ceniza con alto contenido de sílice (SiO<sub>2</sub>), muy contaminante para el suelo y el manto freático [2-3].

Después del aluminio y el acero, el cemento Portland es el material que mayor intensidad energética demanda, debido a sus grandes volúmenes de producción. La creciente preocupación por la degradación medioambiental y la necesidad del uso de materiales de menor intensidad energética, estimulan los esfuerzos por encontrar materiales puzolánicos reemplazantes del cemento, sin que se afecten las propiedades mecánicas de los hormigones. La ceniza de cáscara de arroz (CCA) es uno de los materiales de mejores perspectivas para ser utilizado como adición puzolánica, pues al reaccionar con el cemento en un medio húmedo y a temperatura ambiente, aporta propiedades de durabilidad y resistencia a los hormigones de altas prestaciones, debido fundamentalmente al alto contenido de sílice amorfa en su composición (más de 90 %) [4-8].

La eliminación de volúmenes considerables de CA es un problema del cual no queda exenta la Cooperativa de Producción Agropecuaria (CPA) "Eulalio García", ubicada en el municipio de Melena del Sur, en la provincia de Mayabeque. Dicha cooperativa destina al cultivo del arroz aproximadamente 10 caballerías de tierra (1000 m<sup>2</sup>), por lo que en determinado momento se hace necesario eliminar, bajo garantías medioambientales, este residuo agroindustrial de poca utilización. En el presente trabajo, con vistas a convertir el problema existente de desechos en una oportunidad de desarrollo sostenible para las entidades productoras de arroz (con escasos recursos y medios tecnológicos limitados), se propondrá el diseño de un horno que permita la quema controlada de la CA. Esta tecnología constituye uno de los métodos de aprovechamiento energético de la biomasa más difundido, abarcando una amplia gama de aplicaciones que van desde sistemas muy elementales como son las chimeneas para hogares domésticos, hasta grandes calderas basadas en hornos de lecho fluidizado. La combustión controlada permitirá obtener una ceniza con alto contenido de sílice amorfa, el cual es un producto comercializable, de gran demanda en la industria cerámica y de la construcción, debido a las propiedades que aporta como adición puzolánica. En el mercado internacional la CCA se comercializa a 600 USD la tonelada. Además, la energía térmica contenida en los gases que se producen durante la combustión puede emplearse en distintos procesos agroindustriales que se desarrollan en la CPA y en otras necesidades básicas, propias de este tipo de centro (secado de granos y biomasa, cocción de alimentos, calentamiento de agua, etc.).

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó un análisis bibliográfico sobre el estado del arte en la temática, encontrándose diferentes variantes tecnológicas que utilizan CA como combustible [1, 9-12]. Al analizar las características

socio-económicas de la CPA, se discurre que la opción más factible para aprovechar las propiedades combustibles de esta fibra natural y obtener una CCA de gran actividad puzolánica, es el diseño y posterior construcción de un horno de ladrillos de arcilla refractaria (cosidos a 1627°C), semimecanizado, de combustión por capas en parrilla fija. Por una parte, el ladrillo refractario es un material convencional, de probada durabilidad, que actúa como un aislante eficaz, siendo la gestión para su adquisición relativamente sencilla. Por otra parte, un horno constituye una tecnología adaptable y versátil ante la necesidad de aprovechar energéticamente cualquier otro tipo de biomasa (esto es un factor muy importante si tenemos en cuenta que la mayor parte de las producciones agrícolas de la CPA corresponden a viandas y caña de azúcar). Otra de las ventajas que ostenta un horno es que el control y manejo de sus parámetros de operación (entrada de aire, flujo de combustible, etc.) no constituyen una tarea complicada, por lo que un operario que trabaje en este tipo de equipos necesita menos capacitación que el personal encargado de operar tecnologías que requieran un mayor grado de precisión, como son los gasificadores.

### Dimensionado de la instalación

Por cuestiones constructivas, las paredes exteriores del horno (paredes de ladrillo refractario) estarán delimitadas por una geometría prismática de sección transversal cuadrada. Dentro de la cámara de combustión se montará una pared interior de malla metálica, que mantendrá una geometría cilíndrica. La biomasa a quemar estará contenida entre ambas paredes y será sostenida por una parrilla metálica en el interior del horno. La cámara de combustión se montará a determinada altura sobre el nivel del suelo, con el propósito de conseguir una circulación natural de aire ascendente hacia el interior del horno. El paso del volumen de aire será regulado de forma manual con el auxilio de compuertas de tiro (dampers). El contacto entre el combustible (CA) y el comburente (aire) se logrará a través de la parrilla y la malla metálica. La CCA con propiedades puzolánicas que se obtendrá a través de la quema controlada se acumulará en un colector de cenizas, que se instalará por debajo del nivel del suelo y su extracción se realizará de forma manual [1, 10-11].

Para garantizar una alimentación continua del horno y una distribución uniforme de la CA dentro de la cámara de combustión, se montará un sistema mecánico constituido por un tornillo sin-fin que trasladará el combustible desde un depósito que se encontrará al nivel del suelo hasta un accesorio en forma de campana ubicado en el interior del horno. El ingreso de la CA a la cámara de combustión del horno se realizará a través de una tubería de acero de 4 pulgadas de diámetro, cuya longitud final estará determinada por las dimensiones del túnel de salida de los gases productos de la combustión.

Teniendo en cuenta los volúmenes anuales de CA que se producen en la cooperativa, se establece que el flujo másico de CA ( $\dot{m}$ ) que se le suministrará al horno a través del sistema de alimentación de combustible será de 60 kg/h. Además, para el diseño geométrico se declara que la cámara de combustión estará inicialmente cargada con una masa de CA ( $m$ ) de 60 kg. Para obtener las dimensiones de diseño de la cámara de combustión se utilizarán las ecuaciones (1), (2) y (3), [2, 11]. Estas expresiones definen el ancho de la cámara de combustión ( $L$ ), la altura de la cámara de combustión ( $h$ ) y el diámetro del cilindro interior ( $D$ ) como funciones dependientes de la masa del combustible (en este caso el combustible es CA).

$$L = \sqrt[4]{\frac{m}{221,75}} \quad (m) \quad (1)$$

$$h = \sqrt{\frac{m}{53,5}} \quad (m) \quad (2)$$

$$D = \sqrt[4]{\frac{m}{8263,875}} \quad (m) \quad (3)$$

Para aprovechar la energía térmica contenida en los gases de la combustión se construirá un cuarto de secado de granos y biomasa. Este local estará situado debajo del túnel de salida de los gases y su altura estará delimitada por la distancia vertical que habrá entre el túnel y el nivel del suelo. El cuarto compartirá una de sus paredes verticales con el horno, mientras que la pared horizontal inferior del túnel de gases formará la porción correspondiente al techo del local. Además, en el túnel se instalarán tres accesorios (marmitas) para cocinar y obtener agua caliente. El número de accesorios a instalar y sus dimensiones serán estimados según el volumen de alimentos que se procesan diariamente en la CPA.

El horno tendrá tiro natural o atmosférico y la altura mínima de diseño de la chimenea ( $H_o$ ) se calculará mediante la fórmula representada por la ecuación (4), [13]. Este método depende de los requisitos de contaminación atmosférica por dilución de humos y ha sido adoptado por legislaciones de muchos países, que abogan por una reducción del límite máximo permisible de concentración de contaminantes del aire a nivel del suelo.

$$H_o = \sqrt{A \cdot Q \cdot F \cdot \frac{\sqrt[8]{\frac{n}{V \cdot \Delta T}}}{C_{MAX}}} \quad (m) \quad (4)$$

Donde  $A$  es un parámetro a dimensional que refleja las condiciones climatológicas ( $A=2505,95$ ),  $Q$  es el flujo másico máximo de sustancias contaminantes permitido ( $Q=146 \text{ kg/h}$  de  $\text{CO}_2$ ),  $F$  es un coeficiente a dimensional relacionado con la velocidad de sedimentación de las impurezas a la atmósfera ( $F=1$ ),  $n$  es el número de chimeneas ( $n=1$ ),  $V$  es el flujo volumétrico de gases emitidos ( $V=1519 \text{ m}^3/\text{h}$ ),  $\Delta T$  es la variación de temperatura entre la base de la chimenea y el medio ambiente ( $\Delta T=580^\circ\text{C}$ ) y  $C_{MAX}$  es la concentración máxima de contaminantes recomendado ( $C_{MAX}=100 \text{ mg/m}^3$ ).

El diámetro de salida de la chimenea ( $D_s$ ) se determinará mediante la ecuación (5), [13]. Siendo  $u_c$  la velocidad de salida de los gases por la chimenea ( $u_c=2,5 \text{ m/s}$ ).

$$D_s = 1,128 \cdot \sqrt{\frac{V}{u_c}} \quad (m) \quad (5)$$

### Cálculo termo-energético de la instalación

El sistema de encendido de la biomasa estará constituido por dos conductos ubicados en el interior de la cámara de combustión. Por uno de los conductos se suministrará gas licuado, el cual reaccionará con una chispa producida por el electrodo instalado en el segundo conducto. Con la acción conjunta de ambos se logrará iniciar la llama necesaria para la combustión.

Según la bibliografía consultada [2-3, 7-8] y los datos obtenidos en el Centro de Estudios de la Construcción y Arquitectura Tropical (CECAT), la CA debe quemarse a temperaturas que oscilen entre los  $450^\circ\text{C}$  y los  $900^\circ\text{C}$ , para obtener una CCA de estructura amorfa, con más de 90 % de sílice en su composición; pues al superar los  $900^\circ\text{C}$  de temperatura, comienzan a formarse focos de CCA con estructura cristalina, lo cual atenta contra las propiedades puzolánicas de la misma, provocando que disminuyan los índices de resistencia y dureza de los hormigones de altas prestaciones. Este es el primer motivo por el cual se definirá la temperatura de quema ( $T_Q$ ) de la biomasa en cuestión en  $850^\circ\text{C}$ . El otro motivo por el cual se definirá esta temperatura de quema

de la biomasa es que mientras más se acerque su valor a los 900 °C, se obtendrá una ceniza más fina y por tanto un producto de mayor calidad desde el punto de vista tecnológico.

A partir de la composición gravimétrica de la CA en base principal o de trabajo se realizará el balance energético de la instalación [2, 13-14]. En la tabla 1, se muestra la composición gravimétrica de la CA en base principal o de trabajo.

Tabla 1. Composición gravimétrica de la CA en base de trabajo.		
Elementos	Símbolo del elemento	Porcentaje del elemento en base de trabajo
Carbono	$C^t$	31,28 %
Hidrógeno	$H^t$	4,16 %
Nitrógeno	$N^t$	0,48 %
Oxígeno	$O^t$	29,76 %
Azufre	$S^t$	0,08 %
Ceniza	$A^t$	14,24 %
Humedad	$W^t$	20,00 %

Es importante precisar que de la amplia gama de resultados que se obtendrán mediante el balance energético del horno, en este trabajo solo se mostrarán los resultados más significativos. Éstos permitirán estimar, en posteriores investigaciones, elementos tan importantes como son la cantidad de material (ladrillos refractarios) a utilizar durante la construcción de la instalación y el costo inicial de la misma. El valor calórico inferior de la CA ( $Q_i^t$ ), el calor específico de la CA ( $C_{CA}$ ), el calor físico de la CA ( $Q_{fc}$ ) y el calor disponible ( $Q_d$ ) se determinarán mediante las ecuaciones (6), (7), (8) y (9), [1, 13, 15] respectivamente.

$$Q_i^t = 339,147 \cdot C^t + 1256,1 \cdot H^t + 108,86 \cdot (S^t + O^t) - 25,12 \cdot (9 \cdot H^t + W^t) \quad (\text{kJ/kg}_{CA}) \quad (6)$$

$$c_{CA} = 0,02403 \cdot W^t + 0,04257 \quad (\text{kJ/kg}_{CA} \cdot ^\circ\text{C}) \quad (7)$$

$$Q_{fc} = C_{CA} \cdot T_C \quad (\text{kJ/kg}_{CA}) \quad (8)$$

$$Q_d = Q_i^t + Q_{fc} \quad (\text{kJ/kg}_{CA}) \quad (9)$$

Donde  $T_C$  es la temperatura del combustible CA (25°C).

El coeficiente de exceso de aire ( $\alpha_H$ ) se estimará mediante tablas teórico-experimentales que vinculan las características de diseño del horno (semi-mecanizado, combustible sólido, combustión por capas, sistema de alimentación por tornillo sin-fin, chimenea de ladrillos, etc.) con las posibles infiltraciones de la instalación y los valores recomendados de exceso de aire [13]. El volumen real de aire seco que se le introduce al horno ( $V_a$ ) y la cantidad de CCA obtenida por masa de CA quemada ( $C$ ) se determinarán a través de las ecuaciones (10) y (11), [1, 13].

$$V_a = \alpha_H \cdot [0,0889 \cdot (C^t + 0,375 \cdot S^t) + 0,265 \cdot H^t - 0,0333 \cdot O^t] \quad (\text{m}^3/\text{kg}_{CA}) \quad (10)$$

$$C = (1 - a_{arr}) \cdot \frac{A^t}{100} \quad (\text{kg}_{CCA}/\text{kg}_{CA}) \quad (11)$$

Donde  $a_{arr}$  es el coeficiente de arrastre de las cenizas por los gases de escape y su valor será estimado mediante tablas teórico-experimentales [13], que toman en cuenta que para el tiro natural la cantidad de cenizas que arrastran los gases productos de la combustión es prácticamente nula. Las pérdidas de calor por incombustión química ( $q_3$ ) y las pérdidas de calor por incombustión mecánica ( $q_4$ ) en el horno serán estimadas mediante tablas teórico-experimentales que recomiendan valores porcentuales de perdidas, según el tipo de combustible y el modo de combustión de la biomasa; mientras que las pérdidas de calor por las cenizas extraídas del horno ( $q_6$ ) se evaluarán mediante la ecuación (12), [1, 13].

$$q_6 = \frac{a_{esc} \cdot h_{ceniza} \cdot A^t}{Q_d} \quad (\%) \quad (12)$$

Siendo  $a_{esc}$  la fracción de cenizas que no arrastran los gases de escape, la cual se determinará mediante la ecuación (13), [13]; mientras que la entalpía de las cenizas ( $h_{ceniza}$ ) se estimará mediante una tabla teórico-experimental, cuya variable de entrada es la temperatura de quema de la CA establecida para el diseño del horno (en este caso será de 850 °C) [13].

$$a_{esc} = 1 - a_{arr} \quad (13)$$

Las pérdidas por transferencia de calor ( $q_5$ ) en el horno se estimarán mediante las expresiones de Nusselt, correspondientes a la transferencia de calor por convección y las ecuaciones que rigen la transferencia de calor por radiación dentro de la cámara de combustión del horno [14]. La eficiencia total del horno ( $\eta_{HORNO}$ ) se determinará mediante la ecuación (14), [2, 9, 13] y el calor útil ( $Q_U$ ) a través de la ecuación (15), [13].

$$\eta_{HORNO} = 100 - (q_3 + q_4 + q_5 + q_6) \quad (\%) \quad (14)$$

$$Q_U = Q_d \cdot \left( \frac{\eta_{HORNO}}{100} \right) \quad (Kj/kg_{CA}) \quad (15)$$

Los espesores de las paredes del horno se determinarán mediante las expresiones que rigen la transferencia de calor por conducción [14]; en este sentido, se expondrán los resultados del espesor de las tres paredes verticales del horno de altura 2,17 m ( $\delta_1$ ), el espesor de la pared vertical del horno de altura 1,57 m ( $\delta_2$ ), el espesor de la pared horizontal del horno de longitud 0,72 m ( $\delta_3$ ), el espesor de las paredes verticales del túnel de salida de los gases ( $\delta_a$ ), el espesor de la pared horizontal inferior del túnel de salida de los gases ( $\delta_b$ ) y el espesor de la pared horizontal superior del túnel de salida de los gases ( $\delta_c$ ).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El diseño geométrico de la instalación (dimensionado de la cámara de combustión) dependerá directamente de la cantidad de CA generada anualmente en la CPA. A su vez, la capacidad energética del horno dependerá de su diseño geométrico, de los requerimientos tecnológicos para obtener una CCA de gran actividad puzolánica y del tipo de combustible que se quemará dentro de la cámara de combustión (el cual puede variar según los requerimientos de la CPA). En este sentido es importante señalar que, gracias a las características de diseño del horno (donde se incluye el modo de combustión de la biomasa) se podrán aprovechar energéticamente una amplia gama de residuos sólidos agrícolas. Este es un factor muy importante si tenemos en cuenta que la mayor parte de las producciones agrícolas de la cooperativa se basan en viandas y caña de azúcar; materias primas que pudieran ser aprovechadas energéticamente en determinada época del año, ante la ausencia de cáscara de arroz.

## Resultados del dimensionado de la instalación

Un dimensionado adecuado de la cámara de combustión, del túnel de salida de los gases y del cuarto de secado de granos y biomasa determinará el comportamiento energético y la eficiencia total de la instalación. Los resultados del dimensionado de la instalación se muestran en la figura 1, donde se observa que la altura de diseño de la cámara ( $h$ ) será de  $1,06\text{ m}$ , el ancho de diseño de la cámara ( $L$ ) será de  $0,72\text{ m}$  y el diámetro de diseño del cilindro interior ( $D$ ) será de  $0,29\text{ m}$ .

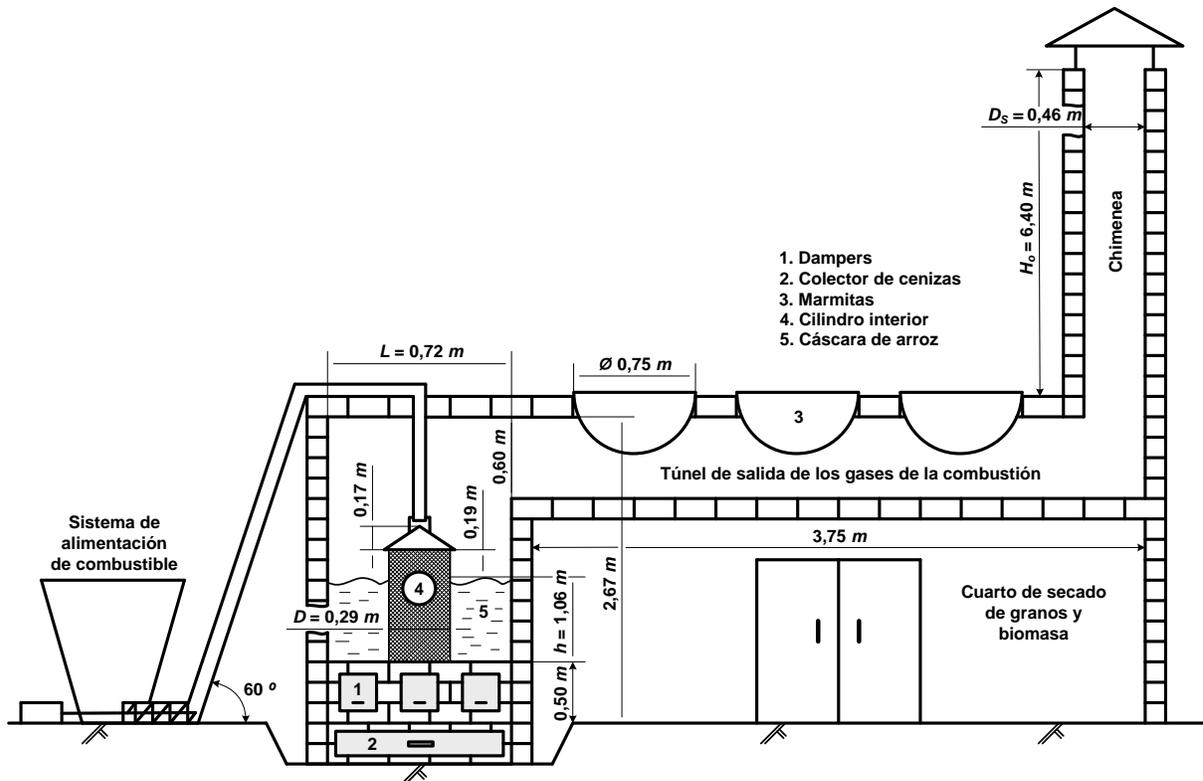


Fig. 1. Dimensionado de la instalación.

Cabe mencionar que a la altura de diseño de la cámara de combustión se le agregará una sobre medida de  $0,19\text{ m}$ , que junto a la porción final del sistema de alimentación de combustible determinarán la altura total del horno en  $2,67\text{ m}$ . Esta sobre medida de la cámara de combustión tiene como finalidad evitar que ingresen al túnel de salida de los gases fragmentos de CA sin quemar, ya que pueden ser arrastradas por el volumen de aire en exceso y por los gases producto de la combustión, debido fundamentalmente a la baja densidad de esta biomasa.

El túnel de salida de los gases tendrá un área de sección transversal cuadrada de  $0,6 \times 0,6\text{ m}$ , mientras que su longitud total será de  $3,75\text{ m}$ . En la parte superior del túnel estarán ubicados los tres accesorios, de  $0,75\text{ m}$  de diámetro, para el procesamiento y cocción de cosechas en la cooperativa. El ancho del cuarto de secado se corresponderá con la longitud del túnel de salida de los gases, mientras que su profundidad estará determinada por la profundidad de la cámara de combustión del horno ( $L=0,72\text{ m}$ ) más una sobre medida de  $0,28\text{ m}$ , que será agregada con el objetivo de facilitar la movilidad de los operarios en el interior del cuarto de secado, por lo que su profundidad total será de  $1,00\text{ m}$ . Por otra parte, teniendo en cuenta las dimensiones del túnel de salida de los gases y el espesor de la pared inferior del túnel, la altura del cuarto de secado será de  $1,90\text{ m}$ .

El tiro o succión de la chimenea depende de la diferencia de densidades entre los gases calientes a la salida de la chimenea y el aire circundante. Un diseño apropiado de la chimenea garantizará la succión necesaria para arrastrar los gases de la combustión a través de las zonas de radiación y convección del horno, para descargarlos a una altura apropiada [13]. En nuestro caso la chimenea tendrá una altura mínima de diseño ( $H_0$ ) de 6,40 m y un diámetro de salida ( $D_S$ ) de 0,42 m. Con estas dimensiones se pretende garantizar el tiro natural de la instalación, aunque debemos mencionar que para hornos de biomasa algunos autores recomiendan incrementar la altura de la chimenea hasta un 30 % más, sobre su altura de diseño.

### Resultados del cálculo termo-energético de la instalación

A partir del balance global de energía se evaluará el comportamiento energético de la instalación y se estimarán los espesores de las paredes. La composición gravimétrica de la CA en base principal será fundamental para determinar los parámetros estequiométricos, característicos de las reacciones de combustión. En primer lugar, es importante establecer la cantidad de masa humedad y la cantidad de masa seca presentes en el combustible, para ello se hace indispensable conocer el porcentaje de los componentes de la CA. En la tabla 2, se muestran los resultados del balance energético.

Tabla 2. Balance energético de la instalación.	
Parámetros	Valores numéricos
$Q_i^t$ (kJ/kg <sub>CA</sub> )	12164,84
$C_{CA}$ (kJ/kg <sub>CA</sub> ·°C)	2,19
$Q_{fc}$ (kJ/kg <sub>CA</sub> )	54,65
$Q_d$ (kJ/kg <sub>CA</sub> )	12219,49
$\alpha_H$	1,55
$V_a$ (m <sup>3</sup> /kg <sub>CA</sub> )	4,34
$a_{arr}$	0,05
$C$ (kg <sub>CCA</sub> /kg <sub>CA</sub> )	0,14
$a_{esc}$	0,95
$q_3$ (%)	0,70
$q_4$ (%)	6,00
$q_5$ (%)	5,76
$h_{ceniza}$ (kJ/kg <sub>ceniza</sub> )	821,05
$q_6$ (%)	0,91
$\eta_{HORNO}$ (%)	86,63
$Q_U$ (kJ/kg <sub>CA</sub> )	10585,74

En la práctica, la combustión real de un combustible transcurre de forma incompleta. Aunque el volumen de aire suministrado al horno sea el teóricamente necesario para que se oxiden por completo los elementos combustibles, aparecen en los productos de la combustión sustancias sin quemar o parcialmente quemadas. Para contrarrestar esta deficiencia, se suministra una mayor cantidad de aire, que el teóricamente necesario, con el objetivo de aumentar la probabilidad de que cada elemento combustible reaccione con una molécula de dióxigeno y ocurra la oxidación, liberándose una mayor cantidad de energía. La cantidad de aire real a suministrar se expresa a través del coeficiente de exceso de aire. En la tabla 2, se observa que el coeficiente de exceso de aire perteneciente al diseño térmico del horno es de 1,55. Esta cantidad se corresponde con los valores recomendados para instalaciones con características energéticas y constructivas similares a nuestro diseño, pues en general los hornos de combustión por capas, alimentados por tornillo sin-fin y con chimeneas de ladrillos con una altura de menos de 10 m presentan un coeficiente de exceso de aire que oscila entre 1,5 y 1,6 [7, 13]. La cantidad de aire que se introduce al horno debe

ser controlada, de manera tal que, el volumen de aire suministrado oscile alrededor del valor recomendado, que en nuestro caso es de  $4,34 \text{ m}^3/\text{kg}_{CA}$ . Si el volumen de aire que actúa como comburente no es regulado en función de la cantidad de combustible que se quema, pueden surgir dos inconvenientes fundamentales. Primeramente, si el exceso de aire es muy elevado pueden ser arrastradas una mayor cantidad de partículas del combustible sin reaccionar, aumentando las pérdidas de energía por incombustión mecánica. Por otro lado, si el aire es insuficiente disminuye el volumen de dióxigeno disponible durante la combustión, aumentando las pérdidas de energía como consecuencia del incremento de la incombustión química [2, 12-13].

La producción de CCA con propiedades puzolánicas se estima en  $0,14 \text{ kg}_{CCA}/\text{kg}_{CA}$ . La calidad de la misma estará determinada, fundamentalmente, por su estructura amorfa. A su vez, la irregularidad en la distribución de las moléculas de ceniza dependerá directamente de la temperatura de quema de la biomasa, la cual debe estar entre los  $450^\circ\text{C}$  y los  $900^\circ\text{C}$  para que la CCA conserve su estructura amorfa; por lo que el monitoreo y control de esta temperatura serán factores imprescindibles a la hora de obtener un producto puzolánico de alta calidad. Una CCA utilizada como adición puzolánica en el cemento, que posea una distribución regular y ordenada de sus moléculas mediante patrones repetitivos extendidos en las tres dimensiones del espacio (estructura cristalina), no aportará a los morteros y hormigones de altas prestaciones las propiedades de dureza y resistencia mecánica esperadas [4-7, 11], debido a que en la medida que la ceniza resultante de la combustión de la CA sea menos amorfa (y más cristalina) su microestructura será más estable y por tanto menos propensa a reaccionar con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  presente en los hormigones.

A partir del estimado de las pérdidas de energía en la instalación, se determina que la eficiencia total del horno será de  $86,63\%$ ; por lo que el calor útil que podrá ser aprovechado en el secado de granos y biomasa, en la cocción de alimentos y en el calentamiento de agua con fines sanitarios será de  $10585,74 \text{ kJ}/\text{kg}_{CA}$ . Comparativamente, este valor de eficiencia térmica es un indicador del buen diseño térmico de la instalación, pues en general los hornos con características constructivas similares al diseño obtenido presentan eficiencias que oscilan entre un  $80\%$  y  $90\%$  [2, 11-13]. En la tabla 3, se muestran los resultados de los espesores de las paredes del horno.

Tabla 3. Espesores de las paredes del horno.	
Espesores	Valores numéricos
$\delta_1 (m)$	0,46
$\delta_2 (m)$	0,40
$\delta_3 (m)$	0,45
$\delta_a (m)$	0,35
$\delta_b (m)$	0,30
$\delta_c (m)$	0,35

Durante el funcionamiento de la instalación los operarios no tendrán la necesidad de estar en contacto directo con las paredes del horno; independientemente de esto, la seguridad del personal encargado de la instalación es un elemento muy importante a tener en cuenta, por lo que los espesores de las paredes tendrán que garantizar una temperatura exterior de las mismas que oscile dentro del rango de tolerancia normalizado para el contacto humano. Otro elemento importante a tener en cuenta es que el espesor de la pared vertical del horno de altura  $1,57 \text{ m}$  ( $\delta_2$ ) y el espesor de la pared horizontal inferior del túnel de salida de los gases ( $\delta_b$ ), tendrán que garantizar una temperatura ambiente dentro del cuarto de secado de granos y biomasa que oscile entre los  $45^\circ\text{C}$  y  $50^\circ\text{C}$ .

## CONCLUSIONES

El dimensionado geométrico y el diseño térmico de la instalación permitirán realizar la combustión controlada de la cáscara de arroz, para obtener un producto puzolánico de alta calidad (ceniza reactiva de cáscara de arroz, con estructura amorfa y más de  $90\%$  de sílice en su composición). A

su vez, los parámetros de diseño del horno permitirán aprovechar energéticamente este residuo agroindustrial, de poca utilización en Cuba, en el secado de granos y biomasa, en la cocción de alimentos, en la elaboración de productos provenientes de las cosechas (conservas) y en la obtención de agua caliente con fines sanitarios. El ancho de diseño de la sección transversal cuadrada de la cámara de combustión será de 0,72 m, la altura de diseño de la cámara será de 1,06 m y el diámetro de diseño del cilindro interior será de 0,29 m. Para garantizar el tiro natural, la chimenea tendrá una altura mínima de diseño de 6,40 m y un diámetro de salida de 0,42 m. Además, se determinó un coeficiente de exceso de aire de 1,55, por lo que el volumen de aire a suministrar en la cámara de combustión, para llegar a un consenso entre las pérdidas de calor por incombustión química y las pérdidas de calor por incombustión mecánica (y de esta manera reducir al mínimo las pérdidas de calor totales) será de 4,34 m<sup>3</sup>/kg<sub>CA</sub>. La eficiencia total del horno fue estimada en 86,63 %, por lo que el calor útil que entregarán los gases productos de la combustión será de 10585,74 kJ/kg<sub>CA</sub>, evidenciándose un buen diseño térmico y un dimensionado adecuado. Para garantizar la seguridad de los operarios, los espesores de las paredes del horno fueron estimados entre 0,46 m y 0,45 m; mientras que los espesores de las paredes verticales del túnel y la pared horizontal superior del túnel de salida de los gases serán de 0,35 m. Los espesores de la pared horizontal inferior del túnel y de la pared vertical del horno de altura 1,57 m, que forman parte del cuarto de secado de granos y biomasa, serán de 0,30 m y 0,40 m respectivamente; con el propósito de garantizar una temperatura adecuada en el interior de este local.

## REFERENCIAS

- [1]. ERRASTI CABRERA, M., *Cáscara de arroz. Diseño de un sistema termo-químico para el aprovechamiento integral de la fibra*. En: XVI Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura. I Congreso Cubano de Fibras Naturales-Taller Internacional de Moringa, Fibra Soluble y Más (FIBRATEC 2012), 2012, La Habana: Palacio de Convenciones de La Habana, p. 226-236, ISBN: 978-959-261-405-5.
- [2]. MADHIYANON, T.; *et al.*, "Combustion Characteristics of Rice-Husk in a Short-Combustion-Chamber Fluidized-Bed Combustor (SFBC)". *Applied Thermal Engineering*, 2010, vol.30, n.4, p. 347-353, ISSN 1359-4311.
- [3]. FAROOQUEA, K.N.; *et al.*, "Characterization and Utilization of Rice Husk Ash (RHA) from Rice Mill of Bangladesh". *Bangladesh J. Sci. Ind. Res.*, 2009, vol.44, n.2, p. 157-162, ISSN 0304-9809.
- [4]. GANESAN, K.; *et al.*, "Rice Husk Ash Blended Cement: Assessment of Optimal Level of Replacement for Strength and Permeability properties of concrete". *Construction and Building Materials*, 2008, vol.22, n.8, p. 1675-1683, ISSN 0950-0618.
- [5]. GOYAL, A.; *et al.*, "Synergic Effect of Wheat Straw Ash and Rice-Husk Ash on Strength Properties of Mortar". *Journal of Applied Sciences*, 2007, vol.7, n.21, p. 3256-3261, ISSN 1812-5662.
- [6]. LE ANH-TUAN, B.; *et al.*, "Effect of Silica Forms in Rice Husk Ash on the Properties of Concrete". *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2012, vol.19, n.3, p. 252-258, ISSN 1869-103X.
- [7]. RODRIGUES, M.S., "Caracterização física e mecânica de argamassas à base de cimento portland e cinza de casca de arroz residual". *Eng. Agríc.*, Jaboticabal, 2010, vol.30, n.2, p. 193-204, ISSN 1808-4389.
- [8]. RUNGRODNIMITCHAI, S.; *et al.*, "Preparation of Silica Gel from Rice Husk Ash Using Microwave Heating". *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 2009, vol.19, n.2, p. 45-50, ISSN 0857-6149.
- [9]. MADHIYANON, T.; *et al.*, "A Novel Cyclonic Fluidized-bed Combustor ( $\Psi$ -FBC): Combustion and Thermal Efficiency, Temperature Distribution, Combustion Intensity, and Emission of Pollutants". *Combustion and Flame*, 2006, vol.146, n.1-2, p. 232-245, ISSN 0010-2180.

- [10]. MADHIYANON, T.; *et al.*, "Cold Flow Behavior Study in Novel Cyclonic Fluidized Bed Combustor ( $\psi$ -FBC)". *Energy Conversion and Management*, 2008, vol.49, n.5, p. 1202-1210, ISSN 0196-8904.
- [11]. NAIR, D.G.; *et al.*, "Reactive Pozzolanas from Rice Husk Ash: An Alternative to Cement for Rural Housing". *Cement and Concrete Research*, 2006, vol.36, n.6, p. 1062-1071, ISSN 0008-8846.
- [12]. ROZAINEE, M.; *et al.*, "Effect of Fluidising Velocity on the Combustion of Rice Husk in a Bench-Scale Fluidised Bed Combustor for the Production of Amorphous Rice Husk Ash". *Bioresource Technology*, 2008, vol.99, n.4, p. 703-713, ISSN 0960-8524.
- [13]. WARNATZ, J.; *et al.*, *Combustion: Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation*. 4th. ed., Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006, ISBN: 978-3-540-25992-3.
- [14]. INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 4th. ed., John Wiley & Sons. Inc., 1996, ISBN: 0-471-30460-3.
- [15]. CHEN, Y., *et al.*, "Application Studies of Activated Carbon Derived from Rice Husks Produced by Chemical-Thermal Process-A Review". *Advances in Colloid and Interface Science*, 2011, vol.163, n.1, p. 39-52, ISSN 0001-8686.

## AUTORES

### **Michel Errasti Cabrera**

Ingeniero Mecánico, Máster en Ciencias Técnicas, Profesor Instructor. Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER), Facultad de Ingeniería Mecánica, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", Cujae, La Habana, Cuba.

e-mail: [merrasti@ceter.cujae.edu.cu](mailto:merrasti@ceter.cujae.edu.cu)

### **Antonio Werner de Dios Ortega**

Ingeniero Mecánico, Máster en Ciencias Técnicas, Profesor Instructor. Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER), Facultad de Ingeniería Mecánica, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", Cujae, La Habana, Cuba.

e-mail: [adedios@mecanica.cujae.edu.cu](mailto:adedios@mecanica.cujae.edu.cu)

### **Andy Amaury Sánchez Rodríguez**

Ingeniero Mecánico, Máster en Ciencias Técnicas, Profesor Instructor. Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER), Facultad de Ingeniería Mecánica, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", Cujae, La Habana, Cuba.

e-mail: [arodriguez@mecanica.cujae.edu.cu](mailto:arodriguez@mecanica.cujae.edu.cu)

### **Carlos Fernández-Aballí Altamirano**

Ingeniero Industrial, Máster en Ciencias Técnicas, Profesor Instructor. Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER), Facultad de Ingeniería Mecánica, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", Cujae, La Habana, Cuba.

e-mail: [carlos@ceter.cujae.edu.cu](mailto:carlos@ceter.cujae.edu.cu)