

**DISEÑO, CÁLCULO Y CONSTRUCCIÓN
DE UN HORNO DE LECHO FLUIDIZADO
ALIMENTADO CON CASCARILLA DE
ARROZ PARA SECADO DE ARROZ
PADDY**

**DESIGN, CALCULATION AND
CONSTRUCTION OF A FEEDED
FLUIDIZED BED OVEN WITH
PADDY RICE DRYING**

**PROJETO, CÁLCULO E
CONSTRUÇÃO DE UMA
CAMA FLUIDIZADA
ALIMENTADA COM
SECAGEM DE ARROZ DE
ALMOFADA**

Yolman Hernández Torres

Coordinador de proyectos de IMALAT SAS
yolman64@hotmail.com

Waldy Jair Torres Zuñiga

Doctorado en Ingeniería Civil. Universidad
Federal de Rio de Janeiro (UFRJ)
waldymas@hotmail.com

Gonzalo Guillermo Moreno Contreras

Ingeniería Mecánica. Universidad de
Pamplona gmoren@hotmail.com

Fecha de Recepción: 10 de junio de 2020

Fecha aprobación: 12 de julio de 2020;

Resumen

Fuentes alternativas de energía han mostrado ser energéticamente eficientes y limpias cuando son comparadas con aquellas a base de hidrocarburos. Los residuos producidos por un determinado proceso industrial pueden tener una función útil como es la generación de energía limpia. En el presente artículo se desarrolló el diseño, el cálculo y la fabricación de un horno de lecho fluidizado alimentado con cascarilla de arroz para generar energía, la cual será posteriormente utilizada en el proceso productivo del arroz. En este caso específico, la energía producida se utilizó para generar aire caliente, el cual se usa en el proceso de secado del arroz paddy, esto permite reducir los costos de producción y dar un mejor direccionamiento ambiental a la cascarilla de arroz.

Palabras clave—Arroz paddy, cascarilla de arroz, biocombustible, horno, humedad.

Abstract

Alternative energy sources have been shown to be energy efficient and clean when compared to hydrocarbon-based ones. The waste produced by a certain industrial process can have a useful function such as the generation of clean energy. In this article, the design, calculation and manufacture of a fluidized bed furnace fed with rice husk to generate energy was developed, which will later be used in the rice production process. In this specific case, the energy produced was used to generate hot air, which is used in the drying process of the paddy rice, this allows reducing production costs and giving a better environmental direction to the rice husk.

Keywords— Paddy rice, rice husks, fuel, boiler, moisture.

Resumo

Fontes alternativas de energia têm se mostrado ser eficientes e limpas em termos de energia quando comparadas a certas bases de hidrocarbonetos. Os resíduos produzidos por um determinado processo industrial podem ter uma função útil, como a geração de energia limpa. Neste artigo, avaliasse o desenho, cálculo e fabricação de uma caldeira de leito fluidizado alimentada com casca de arroz para gerar energia, o qual será atualizado depois no processo de produção do arroz. Nesse caso específico, a energia produzida é empregada para gerar ar quente, usado no processo de secagem do arroz em casca, o que permite reduzir os custos de produção e dar uma melhor direção ambiental à casca do arroz.

Palavras chave— Arroz em casca, casca de arroz, biocombustível, caldeira, humidade.

Introducción

El mundo está pasando por problemas medioambientales, los cuales requieren soluciones novedosas, una solución a estos problemas se puede dar con el uso de biocombustibles o desechos industriales, esto minimizara las emisiones de gases efecto invernadero [1].

El uso de la biomasa se ha venido convirtiendo en una fuente de energía importante en América y el mundo. Sus principales usos se dan en el sector doméstico como medio de calefacción, para preparar alimentos, entre otros [2]. En el sector industrial su uso es menor impacto. Es posible encontrar algunas aplicaciones por ejemplo en la producción de ladrillos, cal, generación de calor para procesos industriales, entre otras. Siendo precisamente en este sector de la generación de energía donde se están dando la mayor

parte de las aplicaciones para el uso de residuos industriales como la biomasa [3].

La cascarilla de arroz utilizada en este proyecto fue la fuente de combustible para el horno. Este tipo de horno provee aire caliente para varios procesos que se llevan a cabo en la industria del arroz [4]. Uno de estos procesos es el secado de arroz paddy. Antiguamente el secado del arroz se realizaba de forma natural por medio de albercas, consumiendo largos tiempos de espera para obtener las propiedades adecuadas para su almacenamiento. Hoy en día se han empleado nuevas técnicas de secado, las cuales utilizan una fuente de calor adicional (aire caliente) para realizar un secado forzado [5], [6].

Teniendo en cuenta este objetivo y haciendo un balance de la producción de la empresa, se realizó el diseño, la construcción, y el montaje mecánico de un horno de lecho fluidizado con capacidad para quemar 1000 kg/h de cascarilla de arroz.

COMBUSTIBLES EMPLEADOS EN EL SECADO DE GRANOS

Los combustibles son sustancias que se pueden quemar y durante la quema liberan energía en forma de calor. La cantidad de energía que es producida durante el proceso de combustión es llamado de poder calorífico (cp). Esta es la característica principal de los combustibles. Las características químicas de un combustible determinan el poder calorífico (cp), su clasificación puede como superior (Hs) e inferior (Hi). La cantidad de calor proveniente de la condensación del vapor de agua presente en la mezcla de la combustión es denominada de poder calorífico superior. Ya el poder calorífico inferior no considera ese tipo de calor. Generalmente se usa el poder calorífico inferior, conocido también como líquido o práctico [7].

La producción de energía a través de la leña, los residuos agrícolas, derivados del petróleo, resistencia eléctrica, energía solar entre otras auxilian en el calentamiento del aire caliente destinado al secado de productos agrícolas [8]. En este proyecto fue utilizada la cascarilla de arroz como fuente alternativa de energía (biocombustible).

CASCARILLA DE ARROZ

El tejido vegetal compuesto por celulosa y sílice es llamado de cascarilla de arroz. Sus constituyentes son los que proporcionan un óptimo rendimiento a este biocombustible. Este subproducto del arroz normalmente es considerado como un desecho del proceso del arroz. El aprovechamiento de la cascarilla de arroz como combustible muestra un avance significativo de la industria, para la preservación de los recursos naturales y la búsqueda de nuevas tecnologías sustentables para la producción de arroz [9].

Diversas características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz son de gran interés de estudio para el entendimiento de sus propiedades energéticas y aplicaciones. Características como el contenido de humedad, la composición química y el poder calorífico (Cp) son aspectos importantes para los ingenieros, ya que estos ayudan a dimensionar los equipamientos y sus componentes (horno) [9].

De acuerdo con Valverde et al. [9] el carbono (C), el hidrogeno (H), el azufre (S), el oxígeno (O), el nitrógeno (N), la humedad (W) y las cenizas residuales (A) son las características químicas más importantes en un combustible. Ya que, a través de su composición química es posible calcular el volumen de aire y la entalpia.

En la Tabla 1., se puede apreciar el poder calorífico (cp) por unidad de masa de la cascarilla de arroz. Es posible observar que el poder calorífico (cp) depende del contenido de humedad de la cascarilla de arroz. Valores de humedad altos afectan la eficiencia de la combustión.

Tabla 1. Poder calorífico (cp) de la cascarilla de arroz en función del contenido de humedad.

| Contenido de Humedad | CP KJ/Kg |
|----------------------|----------|
| 0 | 19880 |
| 10 | 17644 |
| 20 | 15412 |
| 30 | 13180 |
| 40 | 10947 |
| 50 | 8715 |
| 60 | 6413 |

Fuente: Tomado de [9]

Según Valverde et al. [9] un kilo de cascarilla de arroz quemada en su totalidad libera 13.398 kJ a 14.654 kJ de energía. La eficiencia esta alrededor de 80% cuando los quemadores tienen un buen rendimiento.

PUNTO DE EQUILIBRIO DE HUMEDAD DEL GRANO.

Los granos que son procesados en la industria agrícola deben tener un punto de equilibrio en el contenido de humedad específico para su posterior almacenamiento. Los contenidos de humedad para los diversos granos están siendo mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2. Contenido de humedad para el almacenamiento adecuado de algunos productos.

| Productos | Contenido De Humedad |
|------------------|----------------------|
| Cacahuates | 8 % |
| Arroz En Cascara | 11 % |
| Avena | 12 % |
| Cebada | 13 % |
| Frijol | 11 % |
| Maíz | 13 % |

| | |
|------------------|----------|
| Soja | 11 % |
| Sorgo | 12 % |
| Trigo | 13 % |
| Café Beneficiado | 9 A 13 % |

Fuente. Tomado de [9]

Materiales y métodos

Diseño del Horno de lecho fluidizado

Para el desarrollo de este horno, se tuvieron en cuenta varios estudios que orientaron a los autores sobre el mejor sistema a utilizar, tipo de construcción y materiales [8], [10], [11].

Adicionalmente, en algunas empresas del sector arrocero se pudieron observar algunos hornos de mampostería o lecho fluidizado, que sirvieron como referencias para la construcción del nuevo horno.

Teniendo en cuenta estos aspectos, para el diseño del horno se tuvo las condiciones óptimas del secado de granos. Se encontró que, de acuerdo con la experiencia de muchos agricultores y molineros, la temperatura optima en el secado del arroz paddy para una alberca estacionaria, oscila alrededor de los 30 °C a los 40 °C, y para las torres de secado con flujo cíclico, está alrededor de los 50 °C a los 70 °C antes de ser almacenados en los silos de trabajo. En estos procesos se reduce la humedad del grano en cerca de un 11 % su humedad inicial. Siendo este proceso el óptimo en la línea de secado del arroz, minimizando los tiempos de secado, almacenado y producción del arroz.

La función principal del horno es generar calor para transmitirlo al área de secado sin que este transporte ceniza o partículas no deseadas, para esto se tiene dispuesto unas series de trampas en concreto de tipo laberinto y la utilización de ciclones decantadores de partículas.

El incremento de la temperatura se consigue mediante la mezcla de aire limpio con los gases de escape de la combustión, el aire limpio tiene una temperatura ambiente de 28 °C a 32 °C y debe alcanzar una temperatura después de la mezcla de 82 °C como máximo. De acuerdo a los cálculos realizados en la Tabla 3, se determinó que el caudal requerido de los ventiladores de succión de aire caliente es de $55,7 \text{ m}^3/\text{s}$ (Comercialmente - ventilador de $56,64 \text{ m}^3/\text{s}$).

Tabla 3. Caudal requerido.

| Descripción | Medida | Unidad |
|--------------------------------|---------|----------------------|
| Presión de aire en el ducto | 1.7 | Kpsa |
| Temperatura del aire de salida | 81.5 | °C |
| Temperatura ambiente | 28 | °C |
| Calor específico (Cp) | 1.256 | kJ/kg °C |
| Presión atmosférica | 101352 | Kpsa |
| Peso molecular del aire | 29 | Mol |
| Densidad del aire | 1.178 | kg/m ³ |
| R del gas (aire) | 286.9 | J/kg K |
| CP de la cascarilla de arroz | 13398.5 | kJ/kg |
| Caudal de aire | 55.7 | m ³ /seg. |

Fuente: Autores

La reacción química estequiométrica es definida en la ecuación (1). Esta ecuación relaciona la cantidad de masa de aire con la cantidad de masa de combustible.

$$(A/C)_{Estq} = \left(\frac{m_{Aire}}{m_{Comb}} \right) = \frac{4,76a}{1} = \frac{MW_{Aire}}{MW_{Comb}} \quad (1)$$

Substituyendo en la ecuación (1) los valores correspondientes para el peso molecular del aire, de la cascarilla de arroz y la cantidad molar estequiométrica de oxígeno se consigue:

$$(A / C)_{Estq} = ((4,76 * 1,25 * 28,8491) / 13,0189) = 13,185 \text{ [kg] }_{Aire} / \text{ [kg] }_{Comb} ,$$

Los resultados obtenidos arriba, indican que por

cada unidad de masa de combustible se deben suministrar $13.185 \text{ kg}_{Aire} / \text{kg}_{Comb}$ para obtener una reacción de combustión estequiométrica [12].

Ventilador Centrifugo

De acuerdo con Moreno et al. [13], es necesario un exceso de aire del 40 % para airear la combustión. Exceso de aire necesario para tener una óptima combustión en la cascarilla de arroz.

El flujo de aire se obtiene a por medio de un balance estequiométrico de la combustión de la cascarilla de arroz. Por tanto, se tiene que:

$$(A/C)_{Estq-Teórico} = 13,185 \text{ kg}_{aire} / \text{kg}_{comb}$$

$$(A/C)_{Estq-Necesario} = 18,2 \text{ kg}_{aire} / \text{kg}_{comb}$$

como la capacidad del horno es de 1000 kg/h de cascarilla de arroz, se calcula o flujo masico de aire:

$$Q_{aire} = 18200 \text{ kg}_{aire} / \text{h} = 5,05 \text{ kg}_{aire} / \text{s}$$

multiplicando por la densidad del aire en el sitio de trabajo:

$$Q_{aire} = 4,28 \text{ m}^3 / \text{s}$$

este sería el caudal mínimo que deben proporcionar el sistema de ventilación para conseguir una buena combustión de la cascarilla.

Parrilla de Quemado

Este horno utiliza parrillas inclinadas para obtener una mayor eficiencia de la quema. Autores como Moyano et al. [11] recomiendan

que la inclinación de las parrillas debe variar entre 40° a 50° . El interior del horno alberga 10 parrillas de dimensiones $0,80 \times 0,50 \times 0,30 \text{ m}$. Estas parrillas tienen orificios avellanados de $17,46 \times 10^{-3} \text{ m}$, para impedir el paso de la cascarilla de arroz al interior de la cámara de aire.

A partir de las dimensiones de las parrillas, se prosigue a calcular el número de orificios necesarios para que la combustión tenga un buen desarrollo y toda la cascarilla de arroz se quemara completamente. Se asumió una velocidad de $v = 19 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, velocidad por la cual está por debajo de las velocidades de transporte de partículas, que son a partir de los $22,9 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ [14].

$$Q_{\text{aire}} = Q_{\text{entrada}} \quad (2)$$

$$Q_{\text{aire}} = v * N * A$$

donde Q_{entrada} es el caudal de aire de entrada, A es el área de los orificios (diámetro de $6,35 \times 10^{-3} \text{ m}$), y N es el número de orificios necesarios en las placas, que para este caso será de 7160 orificios en total (710 por parrilla).

Tolvas para Almacenar Cascarilla de Arroz.

Las tolvas que almacena la cascarilla, son alimentadas por un elevador de cangilones de capacidad de $1000 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$, siendo estas tolvas fabricada en lámina ASTM-A36 calibre 14. Cada tolva tiene la capacidad de almacenar 500 kg de cascarilla de arroz. Teniendo en cuenta la densidad de la cascarilla de arroz ($\rho = 100 \text{ kg/m}^3$) [13] y la capacidad de las tolvas, se determinó que el volumen de estas debe ser 5 m^3 .

Adicionalmente, se estableció que la geometría de las tolvas sería con una inclinación de $49,6^\circ$ [11], para que la cascarilla de arroz se deslice y por efectos de la fuerza

gravitacional el producto caiga en el interior de los dosificadores (sinfines).

Sistema de Alimentación

El sistema de alimentación está compuesto por tornillos sinfín, los cuales fueron fabricados en lámina ASTM-A36. Este material ha mostrado buenos resultados en este tipo de aplicaciones. Conociendo la alta abrasividad de la cascarilla de arroz se optó por seleccionar una lámina de calibre 14 [13].

Chimenea, Salida de Gases

Para este horno, y por su capacidad, se diseñó con dos chimeneas fabricadas en lámina ASTM-A36 calibre 14 del tipo modulares (para permitir un fácil montaje y mantenimiento), otra razón para el uso de dos chimeneas es debido a que se emplean como baipás en la regulación de los gases calientes, en caso de que haya un colapso o una falla en los ventiladores de succión, permitiendo de esta forma su desalojo a una altura de referencia, que según el Artículo 48 del Decreto 02 del 82, se estima que la altura mínima para este tipo de aplicaciones debe ser de 15 m [15].

El horno cuenta una altura aproximada de $17,3 \text{ m}$ de altura, cumpliendo con las normas ambientales.

Sinfín Cenizas

Para este equipo, se tomaron 5 muestras de la cantidad de cascarilla que fue quemada. Se determinó que el porcentaje de reducción en el peso de la cascarilla es de aproximadamente el 75 %. Este sistema debe manejar una capacidad aproximada de $252,2 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$. Al igual que el sinfín de alimentación, este fue fabricado en lámina de acero ASTM-A36 de calibre 14 para soportar la abrasividad de la ceniza.

Diseño Final del Horno

El diseño del horno fue realizado con el software Solid Edge®. En las Figuras 1 y 2 se puede observar un esquema general y un modelo 3D detallado del horno y sus componentes.

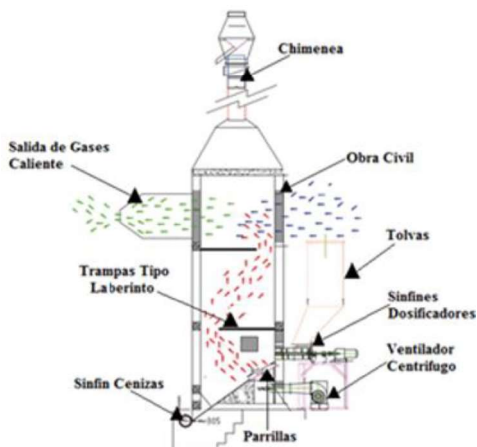


Figura 1. Esquema básico del horno.
Fuente: Autores

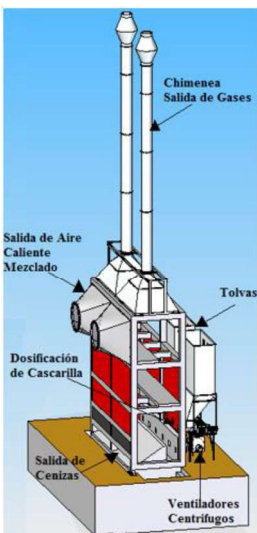


Figura 2. Horno de lecho fluidizado, vista isométrica. Solid Edge®.
Fuente: Autores.

CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL HORNO.

En las Figuras 3, 4, 5 y 6 se puede observar parte de la construcción del horno de lecho

fluidizado y el montaje de sus equipos auxiliares.



Figura 3. Tolvas de almacenamiento de la cascarilla.
Fuente: Autores.



Figura 4. Montaje de las chimeneas de salida de gases.
Fuente: Autores.



Figura 5. Amarre de las chimeneas, salida de gases de combustión.
Fuente: Autores.



Figura 6. Transmisión de potencia de los tornillos sinfines.

Fuente: Autores.

PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Inicialmente, se presentaron inconvenientes con el encendido del horno, para lo cual fue necesario comenzar la ignición de la cascarilla de arroz con ACPM. Posteriormente se retira la ayuda del combustible utilizado y se suministrar la cascarilla de arroz en forma homogénea por medio de los sinfines alimentadores. La dosificación de estos sinfines debe ser la mínima necesaria para no sobrecargar el sistema, de tal forma que no se ahogue.

Varias mediciones de caudal y de temperatura fueron necesarias en diferentes puntos del horno. De acuerdo con la Figura 6, se puede observar los puntos específicos de mediciones en el horno. Estos puntos fueron, la cámara de combustión (1, Q1, T1), la entrada (2, Q2, T2) y la salida (3, Q3, T3) de la cámara de mezclado. Durante este proceso se variaron las condiciones de alimentación de la cascarilla de arroz y el caudal de aire. Llegando a unas condiciones óptimas de operación del horno. Se pudo observar un aprovechamiento aproximado del 72 % de la energía generada.

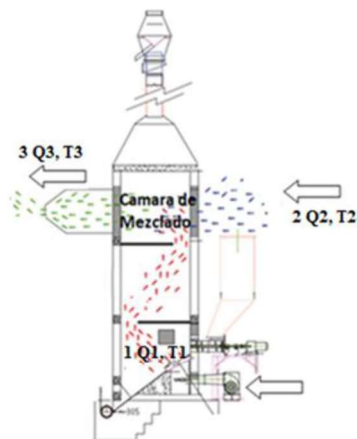


Figura 11. Principio de funcionamiento del horno.

Fuente: Autores.

EFFECTOS AMBIENTALES EN LA COMBUSTIÓN DE LA CASCARILLA DE ARROZ

El estudio de los efectos ambientales debido a la combustión de la cascarilla de arroz, se debe realizar por medio de un monitoreo y análisis isocinéticos rigiéndose por las normas ambientales nacionales e internaciones. Mas detalles sobre este estudio puede ser encontrado en [16] y [17].

Material Particulado

La interpretación y comparación de la norma de emisión para partículas - NE, se hace con base en el Artículo 48 del Decreto 02 del 82, norma de emisión de partículas para calderas a base de carbón además se tiene en cuenta el Artículo 43 del mismo decreto, el cual establece la fórmula para aplicar el factor de modificación por altitud o localización geográfica de la emisión [16].

A partir del poder calorífico de la cascarilla de arroz 3200 kcal/kg , se tiene que para esta aplicación es generada $3,2 \times 10^6 \text{ kcal/h}$ debido a la quema de la cascarilla de arroz. De acuerdo con el Artículo 48, se dice que

cuando el calor consumido es inferior 10 millones de $kcal/h$ en zona rural, no se debe permitir una emisión mayor de 2 kg de partícula por cada millón de kilocalorías consumidas o 2 kg/106 kcal.

Se estima que el máximo de material particulado que se puede emitir cuando el horno esté en pleno funcionamiento es de 0,64 kg. Estos valores de material particulado deben tener una corrección, ya que los valores estipulados por las normas son tomados con referencia al nivel del mar. La corrección debe ser 0,98 veces el valor actual, con lo cual se obtiene que el máximo de material articulado que se puede emitir cuando el horno este en pleno funcionamiento es de 0,62 kg.

A futuro se deben realizar otras mediciones para certificar que la cantidad de material particulado que va al ambiente no sobrepase los límites establecidos por norma.

ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL SECADO DE ARROZ

Los resultados obtenidos en el funcionamiento del horno fueron óptimos. El grano de arroz en el estado inicial llegó con una humedad de 22,5 % se logró reducir su humedad en un 11 % de la humedad inicial. Después de la reducción de la humedad, el grano de arroz es almacenado en silos a una temperatura constante de 38 °C hasta obtener las propiedades adecuadas de acuerdo con las condiciones de calidad mínimas requeridas.

Se pudo observar que el exceso de calor no acelera el proceso de secado. Este incremento provoca rajaduras en el grano, daño en el producto y desperdicio de energía. Por ese motivo la temperatura a la salida del sistema de aire caliente hacia la torre de secado de arroz con flujo cíclico no debe exceder de los 82 °C.

Adicionalmente, se observó que un incremento en la temperatura ambiente de la zona donde se localiza la planta, menor era la cantidad de cascarilla de arroz necesaria para alcanzar la temperatura de secado del arroz.

Conclusiones y recomendaciones

Al utilizar un combustible económico como la cascarilla de arroz es posible disminuir el costo de secado del arroz y contribuir de forma directa con el medio ambiente (menos polución de particulado).

El diseño de las parrillas utilizadas en el sistema, incrementa la eficiencia en la quema de este tipo de combustible. La inclinación de las parrillas permite que la cascarilla circule y alcance una quema completa, lo que facilita la recolección de las cenizas por medio de tornillo sinfín.

El diseño de las trampas tipo laberinto ubicadas en el interior del horno fueron diseñadas con la finalidad de evitar el ingreso de material particulado a la zona de secado y al medio ambiente. Su configuración fue diseñada para tener un mínimo de arrastre de las cenizas en el interior del horno.

Una buena combustión es realizada a través de un equilibrio entre la cantidad de aire y la cantidad de combustible necesario para tener una óptima reacción química (estequiometría). La ineficiencia de la combustión produce emisión de gases tóxicos y materiales particulados. En este estudio fue establecido dos intervalos de tiempo distintos, con la finalidad de identificar cuando ocurría la buena quema de la cascarilla y cuando la cascarilla no se quemaba completamente. Se pudo observar que este problema se debe a la forma de alimentación del horno. Indicando que se debe mejorar o regular la dosificación

de biocombustible al interior de la cámara de combustión.

Es recomendado realizar un mantenimiento periódico cada 2 meses de todos los componentes del horno. Este mantenimiento consiste en una limpieza en el interior del horno, en las chimeneas y en los tornillos sinfines. A parte de eso, también es necesario realizar inspecciones visuales de cada uno de los componentes, lubricar y verificar su correcto funcionamiento. Otras premisas más de talladas de mantenimiento deben ser también contempladas.

Es recomendado realizar un análisis y monitoreo de material particulado, o análisis isocinetico anualmente, rigiéndose según las normas ambientales nacionales e internacionales. El objetivo de este análisis es garantizar el cumplimiento de las normas de protección ambiental de fuentes de emisiones fijas.

Se sugiere colocar a las tolvas de almacenamiento un sistema de vibración para que la cascarilla de arroz no se aglomere y caiga fácilmente sobre el sistema de alimentación.

Durante todo el proceso del arroz se recomienda coleccionar muestras de arroz para observar su calidad y verificar si el arroz que están siendo procesado cumple o no con las normas establecida.

Bibliografía

- [1] Thao, P. T. M., Kurisu, K. H., & Hanaki, K. (2011). Greenhouse gas emission mitigation potential of rice husks for An Giang province, Vietnam. *Biomass and Bioenergy*, 35(8), 3656-3666.
- [2] Machado, C. (2010). Situación de los Biocombustibles de 2da y 3era Generación en América Latina y Caribe. Brasilia (Brasil): Organización latinoamericana de energía-ILCA.
- [3] Solarin, S. A., Al-Mulali, U., Gan, G. G. G., & Shahbaz, M. (2018). The impact of biomass energy consumption on pollution: evidence from 80 developed and developing countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(23), 22641-22657.
- [4] Prasara-A, J., & Gheewala, S. H. (2017). Sustainable utilization of rice husk ash from power plants: A review. *Journal of cleaner production*, 167, 1020-1028.
- [5] Benavente Herreros, G. (2009). Evaluación técnico económica de dos sistemas de almacenaje de arroz en un fundo de Chile Central.
- [6] Sánchez, N. C., Salazar, A. L. P., Ramos, A. M. N., Calderón, Y. M., & Serrezuela, R. R. (2018). Optimization of the Paddy Rice Husking Process, Increasing the useful Life of the Rollers in Florhuila Plant Campoalegre Mills. *International Journal of Applied Engineering Research*, 13(6), 3343-3349.
- [7] Conceptos sobre combustión (2006, septiembre 25). Recuperado el 12 de febrero de 2020, de
- [8] <http://www.textoscientificos.com/quimica/combustion>
- [9] Chicaiza, M. (2007). Diseño de una Secadora de Arroz con Intercambiador de Calor para una Piladora.

- [10] Valverde, A., Sarría, B., & Monteagudo, J. P. (2007). Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz. *Scientia et Technica*, 1(37).
- [11] Chao Tung-San, J. F. (2009). Pautas para el diseño y construcción de fogones eficientes para la combustión de cascara de arroz (Bachelor's thesis).
- [12] Moyano, D., Aguilar, F., & Cardenas, M. (2011). Diseño de una secadora de tandas para arroz usando como combustible cascarilla de arroz.
- [13] Camargo, J. V., & Restrepo, A. H. (2004). Caracterización térmica y estequiométrica de la combustión de la cascarilla de arroz. *Scientia et Technica*, 1(24).
- [14] Moreno-Contreras, G. G., Serrano-Rico, J. C., & Palacios-Restrepo, J. A. (2009). Industrial waste combustion performance in a bubbling fluidized bed reactor. *Ingeniería y Universidad*, 13(2), 251-266.
- [15] Flores, J. E., Villaflores, G., Velasco, J. W., & Bisonard, E. R. (2017). Determinación de la Velocidad de Transporte de Partículas por Saltos en Conductos Horizontales. *Información tecnológica*, 28(6), 199-206.
- [16] Comisión de Regulación, D. E. Y. G. (2007). Comisión de Regulación de Energía y Gas.
- [17] Normas Referentes a la calidad de aire y emisiones atmosféricas (2009, febrero 10). Recuperado el 19 de febrero 2020, de <https://www.cortolima.gov.co/normas-referentes-calidad-aire-emisiones-atmosfericas>
- [18] Leyes y Normas – Reglamentos ambientales. Recuperado el 19 de febrero 2020, de <https://espanol.epa.gov/espanol/leyes-y-normas-reglamentos-ambientales>