

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad Ingeniería Mecánica

CEETA



Trabajo de Diploma

Título: Análisis de alternativas de secado de arroz con uso de energía renovable o residual

Autor: Kien Tran Trung

Tutor: MSc. Reinaldo Martínez Martínez

Santa Clara 2011

Resumen

En el presente trabajo se realiza un análisis de las alternativas de secado de arroz y el posible uso de energía renovable o residual para esta tarea. Del análisis bibliográfico se deduce que es necesario reducir la humedad del arroz de cosecha hasta 12 a 14 % para su conservación y procesamiento. Se estudian también los distintos métodos usados para el proceso de secado. Son necesario 20 kWh de electricidad y 14 l de combustible como índice promedio de consumo energético para secar una tonelada de arroz de 23 % humedad inicial. Se analizaron las capacidades de secado de dos fuentes energéticas elegidas, la primera es la del calor residual de los Grupos Electrónicos que mostró que con el uso del calor residual de un motor Hyundai 1,7 MW a 85 % de carga se puede lograr secar 8,3 toneladas de arroz durante una hora y en el uso de la cascarilla de arroz como combustible para el secado de arroz son necesarios 38 kg para secar una tonelada de arroz.

Palabras claves: arroz, secado, consumo, fuente, paddy.

Summary

In the paper being presented, the alternatives for drying of rice using renewable or waste energy has been analyzed. A detailed review of literature on rice is performed which shows the necessity to reduce the moisture content of rice up to 12 to 14% for its preservation and processing. The various methods used for drying and energy sources proposed for its consumption has been presented. For the required analysis, 20 kWh of electricity and 14 l of fuel were taken, as an average rate of energy consumption for drying one ton of rice from 23% of initial moisture. With this index the analysis of the drying capabilities of two energy sources chosen was done, the first source analyzed was the waste heat from electric generators which shows that the usage of waste heat of a Hyundai motor 1.7 MW can be used to dry 8.3 tons of rice per hour. And in the usage of rice husks as combustible for drying it is necessary 38 kg of rice husks for drying one ton of rice.

Keywords: rice, drying, consumption, power, paddy.

Contenidos

Resumen	1
Summary	0
Introducción:	3
Capítulo 1: Introducción al arroz y su proceso de secado	7
1.1. Origen y difusión del cultivo del arroz.....	7
1.2. Producción mundial de arroz.....	7
1.3. El cultivo popular del arroz en Cuba.....	8
1.4. Generalidad del secado de cereales	10
1.5. Principios técnicos del secado	11
1.6. Técnicas de secado	12
1.6.1. Secado anterior a la trilla	12
1.6.2. Secado después de la trilla.....	15
1.7. Descripción de un secador.....	28
1.8. La calidad del secado.....	30
1.9. Fuentes energéticas.....	31
1.9.1. Cogeneración con motor alternativo.....	31
1.9.2. Biomasa.....	32
1.9.3. Energía solar	32
Capítulo 2: Análisis de uso de fuentes de energías renovables o residuales en el secado de arroz.	34
2.1 Análisis de uso de la energía residual de los Grupos Electrónicos	35
2.1.1 Análisis de los indicadores del consumo energético	35
2.1.2 Análisis de los grupos electrónicos.....	37

2.2. Análisis del uso de cascarilla de arroz como combustible para secado de arroz	40
2.2.1 Producción de cascarilla de arroz (CA).....	40
2.2.2 Propiedades físicas de la cascarilla de arroz	40
a. Tamaño de la Cascarilla.	40
b. Densidad de la cascarilla.	41
c. Equilibrio del contenido de humedad.	41
2.2.3 Propiedades químicas de la cascarilla.....	42
a. Composición química de la cascarilla.....	42
b. Composición química de la ceniza.....	43
c. Poder calorífico de la cascarilla.	43
2.2.4 Cálculo aproximado de capacidad de secado de cascarilla de arroz.....	45
2.2.5 Solución para su aplicación	46
Comparación de uso las fuentes de energía analizadas:	48
Conclusiones:	50
Bibliografías:	52
Anexos:	53

Introducción:

La crisis del petróleo hace más obvia la dependencia económica de los combustibles fósiles, como consecuencia de ello la necesidad de nuevas fuentes de energía se ha convertido en un asunto más urgente. Las fuentes de energía renovables están llamadas a proporcionar la solución a este problema puesto que ellas son inextinguibles y tienen un menor impacto adverso sobre el medio ambiente, en relación a los combustibles fósiles.

La existencia de un mayor interés y urgencias en las tecnologías aplicables a las fuentes de energías renovables se fundamenta no sólo en los beneficios ambientales, sino que también se sustenta en el fomento económico sustentable que estas fuentes ofrecen.

En el proceso del secado de arroz se consume una cantidad de energía considerable, la cual en los momentos actuales proviene de fuentes fósiles, por tal motivo el hecho de encontrar nuevas fuentes de energía para el secado de arroz resultaría muchos beneficios tanto en esfera económica como en la protección ambiental.

Una de las fuentes energéticas renovables que se estiman con muchas perspectivas es la biomasa. En la actualidad se vuelve a la biomasa como una solución energética eficiente que permita nuevas concepciones económicas de su aprovechamiento para obtener una serie de beneficios entre los que se encuentra la reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera, fundamentalmente de CO₂, causante del efecto invernadero y SO₂ de la lluvia ácida. En efecto, el balance de producción de CO₂ se estima es nulo, ya que el carbono liberado a la atmósfera ha tenido que ser previamente fijado de ésta en el proceso de la fotosíntesis y en cuanto al SO₂, el nivel de contenido de azufre es bajísimo. Un residuo agrícola que puede ser utilizado en un gran número de países para cubrir sus necesidades de energía es la cáscara de arroz, debido a su razonablemente elevado contenido de energía.

Grandes cantidades de cáscara de arroz se generan anualmente como el mayor subproducto de los molinos industriales. La producción anual mundial de arroz está alrededor de 500 millones de toneladas y asumiendo que el 20 % sea cáscara, la producción anual mundial de cáscara de arroz es de aproximadamente 100 millones de toneladas. Hoy día, la mayor parte del excedente de cáscara de arroz se destruye o elimina por medio de la combustión a cielo abierto, lo cual resulta en pérdidas de energía (calor), Esto trae como consecuencia un mayor interés en utilizar la cáscara de arroz como una fuente de energía renovable. [1]

En realidad la energía que se utiliza actualmente en proceso de secado de arroz proviene mayormente de energía solar, pues el secar al sol ha sido un método tradicional. En algunos países, los cultivos se secan extendiéndolos sobre los caminos, en las playas o en los techos de las casas, aprovechando el calor absorbido por estas superficies. Muchas veces se usan las rocas planas con el mismo propósito. El uso de esta energía presenta varias ventajas, no se requiere ningún costo adicional, no se necesita estructuras permanentes, sin embargo, tiene sus límites, la producción está siempre dependiente al clima, el productor no puede controlar la velocidad y calidad del secado. Además esta energía no está repartida igualmente en todas regiones la cual sería difícil su uso en las zonas que no tiene un tiempo promedio soleado anual alto.

La energía residual es uno de los recursos energéticos con mayor disponibilidad en el mundo. De acuerdo con el Departamento de Energía de Estados Unidos existe más potencial en la utilización de la energía residual disponible que en todo el resto de energías renovables combinadas. Al utilizar la energía residual se podrá lograr resolver a la vez dos problemas, uno es elevar la eficiencia del consumo energético de los procesos industriales y otro es dar una alternativa para la búsqueda de nuevas fuentes energéticas. En nuestro país la posibilidad de utilizar la energía residual se centra en los Grupos Electrónicos donde enormes cantidades de energía son emitidas a la atmósfera en forma de calor residual.

Existen distintas alternativas para el problema energético del proceso de secado, pero siempre se adapta una mejor que la otra para determinadas condiciones, por lo tanto un análisis profundo de las alternativas de energía para el proceso de secado contribuirá al desarrollo de la producción de arroz en el país.

Situación problemática:

En la producción arrocerera se consume una cantidad de energía considerable en el secado del arroz, la cual en los momentos actuales proviene de fuentes fósiles, por lo tanto es necesario realizar un estudio cuidadoso de cómo sustituir estas fuentes por las fuentes renovables o residuales

Problema de investigación:

En el proceso de secado de arroz se consume una cantidad de energía considerable, la cual en los momentos actuales proviene de fuentes fósiles. Resulta necesario un estudio de las alternativas de secado con el uso de nuevas fuentes de energía a fin de desplazar las energías provenientes de fuentes fósiles.

Hipótesis:

Si se realiza un análisis profundo de las posibilidades de utilizar nuevas fuentes energéticas se podrá desplazar una gran cantidad de energía fósil usada actualmente en el proceso de secado de arroz.

Preguntas de investigación:

¿Cómo se procede un proceso de secado de arroz?

¿Cuáles son las fuentes de energía posibles para el consumo energético en el proceso de secado de arroz?

¿Cuáles son los beneficios se logran al utilizar tal fuente de energía?

Objetivo general:

Analizar desde punto de vista teórica las posibilidades de utilizar fuentes de energía renovable o residual en el proceso de secado de arroz.

Objetivos específicos:

- Caracterizar la producción de arroz en el mundo y en Cuba.
- Caracterizar mediante la revisión bibliografía, los principios de secado y sus métodos.
- Obtener los indicadores de consumo energético en el secado de arroz.
- Analizar las características de las energías renovables para ser utilizada en el secado del arroz.
- Proponer la utilización de fuentes renovables o residuales de energía para el secado de arroz.

Capítulo 1: Introducción al arroz y su proceso de secado

1.1. Origen y difusión del cultivo del arroz

El arroz (*Oryza sativa* L.) es uno de los cereales que se cultivan desde la antigüedad. El más lejano testimonio que se tiene corresponde al año 2800 a.C. en que un emperador chino estableció un rito ceremonial para la plantación del arroz. En 1000 años a.C. era conocido en la India y hacia 400 años a.C. en Egipto. En la Edad Media, el arroz es introducido en el sur de Europa con la invasión de los moros, En España, no se conoce la época en la que se introdujo, aunque los musulmanes lo cultivaron con éxito durante el tiempo de ocupación de la Península en Sevilla, Córdoba, Granada, Murcia, Alicante y Tarragona. En Europa, se cultiva también en Grecia, Turquía, Rumania, Hungría e Italia, si bien la producción es insuficiente para el consumo, lo que ha obligado a importarlo en su mayor parte. En América llega con los conquistadores se cree que en 1694 cuando el capitán de un barco entregó unas semillas al gobernador de Charlestown, en pago por la reparación de su barco. En el siglo XVIII se cultiva el arroz en el sur de los Estados Unidos, el llamado arroz Carolina.

En Cuba el arroz fue introducido en Las Antillas por los españoles, pocos años después del descubrimiento de América y se supone que en Cuba se introdujo procedente de la República Dominicana. En la etapa colonial la producción se hacía de secano, pues se consideraba que el cultivo por aniego era insoluble, por tanto la época de siembra se limitaba a los meses lluviosos del año.[2, 3]

1.2. Producción mundial de arroz.

La producción está geográficamente concentrada en Asia. Tan solo siete países asiáticos (China, India, Indonesia, Bangladesh, Vietnam, Myanmar y Tailandia) producen y consumen el 80% del arroz del mundo.

Las variedades de arroz cultivadas han ido variando en los últimos años, mediante una gradual renovación de las más antiguas, en función de las mejores características provocando la desaparición de determinadas variedades, pues las nuevas ofrecen mejores rendimientos, una mayor resistencia a enfermedades, altura más baja, mejor calidad de grano o una mayor producción. Los programas de mejora genética se basan en la producción de plantas de arroz decaploides, mediante el cultivo de anteras de plantas obtenidas a partir de cruzamientos previos.

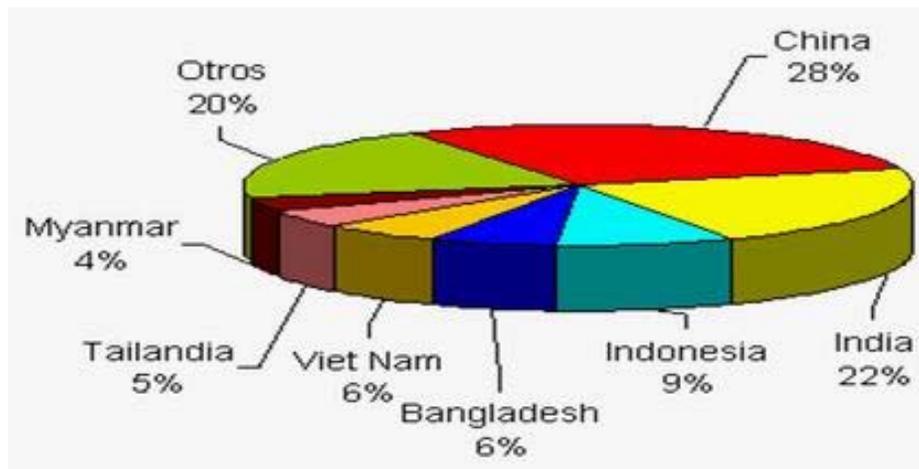


Figura 1.1: Producción mundial de arroz cáscara.[4]

Según informó la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) la producción mundial de arroz aumentará un 1,8% lo equivalente a 12 millones de toneladas, si las condiciones meteorológicas son normales. El mercado internacional del arroz se enfrenta en la actualidad a una situación especialmente difícil, con una demanda mayor que la oferta y un aumento considerable de los precios, fue lo que advirtió Concepción Calpe, economista superior de la FAO.[4]

1.3. El cultivo popular del arroz en Cuba.

El arroz constituye un alimento básico en la dieta del pueblo cubano. Datos oficiales (Castillo, 1997) atestiguan que el consumo per cápita anual asciende a 44 kg,

tomando en consideración la cantidad total de arroz que se comercializa, el total de habitantes que tiene el país así como también el consumo social (círculos infantiles, escuelas, hogares de ancianos, hospitales, etc.). Sin embargo, este consumo per cápita es más elevado entre la población rural y campesina que son productores habituales de este cereal y que lo producen fundamentalmente para satisfacer necesidades familiares; en esta población, el per cápita de consumo no debe ser menor del doble del oficialmente reportado por las estadísticas antes citadas. A partir del per cápita anual de 44 kg, significa que cada cubano ingiere diariamente 120 g de arroz. Acorde con los hábitos de consumo de la población, el arroz es mayoritariamente ingerido cocinando el grano blanco y pulido, aunque con frecuencia se cocina en combinación con el frijol negro o rojo, que se conoce como arroz congrí. Aunque el autoabastecimiento nacional de este cereal siempre ha constituido una meta, la producción nacional de arroz especializada en la década de los años 80 logró satisfacer la demanda interna como máximo en un 60 % teniendo que importarse el resto del arroz a consumir. Sin embargo, la ulterior depresión económica iniciada a principios de la última década ha provocado la reducción de las áreas de siembra y de la producción, lográndose satisfacer sólo el 20-25% de las necesidades, lo que ha incrementado las importaciones para satisfacer los niveles de consumo establecidos.

En función del grado de desarrollo que se ha logrado en cada provincia del país con respecto al área de siembra se ha hecho una agrupación que comprende:

- Provincias grandes como Pinar del Río que siembra anualmente 15000-16000 hectáreas y produce no menos de 26000 toneladas de arroz consumo.
- Provincias medianas como Ciego de Ávila que siembra anualmente aproximadamente 6000 hectáreas y produce unas 6000 toneladas de arroz consumo.

- Provincias pequeñas como Santiago de Cuba que siembra anualmente 600-800 ha produce unas 700 toneladas de arroz consumo como promedio.

En los tres últimos años se han sembrado como promedio en todo el país entre 90 y 100 mil hectáreas bajo esta forma de producción y se han producido unas 110-130 mil toneladas de arroz consumo, con la particularidad de que la totalidad de las provincias del país tienen un determinado grado de participación no totalmente cuantificado.[5]

1.4. Generalidad del secado de cereales

Cientos de millones de toneladas de trigo, maíz, soja, arroz y otros granos como el sorgo, la semilla de girasol, la colza, la cebada, la avena, etcétera se secan en deshidratadores de grano. En los principales países agrícolas, el secado comprende la reducción de humedad desde unos 17-30% por peso a valores entre 8 y 15%, según el grano. El contenido de humedad final para el secado debe adecuarse al almacenaje. Cuando más aceite tenga el grano, menor será el contenido de humedad (aunque su humedad inicial también será menor). Los cereales se secan a menudo hasta el 14% por peso, mientras las oleaginosas al 12,5% (soja), 8% (girasol) y 9% (cacahuete). El secado se realiza como requisito para un almacenaje seguro, de forma que se inhiba el crecimiento microbiano. Sin embargo, las bajas temperaturas de almacenajes también están altamente recomendadas para evitar las reacciones de degradación y especialmente el crecimiento de insectos y ácaros. Una buena temperatura máxima de almacenaje está sobre los 18°C.

Los mayores deshidratadores suelen usarse fuera de la granja, en elevadores, y son de tipo continuo, pudiendo producir hasta 100 toneladas métricas de grano seco por hora. La altura de aire que el grano debe atravesar en los deshidratadores continuos varía desde unos 0,15 m en los de flujo mixto (preferidos en Europa) a unos 0,30 en los de flujo cruzado (preferidos en los Estados Unidos).

Los deshidratadores de lote se usan principalmente en la granja, especialmente en Estados Unidos y Europa. Suelen consistir en una cuba con aire calentado pasando horizontalmente desde un cilindro interno a través de una hoja de metal perforada interna, y entonces a través de una cama de grano anular, de unos 0,50 m de grosor (coaxial con el cilindro interno) en dirección radial, y finalmente a través de la hoja de metal perforada externa, antes de liberarse a la atmósfera. Los tiempos de secado normales oscilan de 1 a 4 h según la cantidad de agua que quiera retirarse, el tipo de grano, la temperatura del aire y la profundidad del grano. En los Estados Unidos, los deshidratadores continuos contracorriente pueden encontrarse en la granja, adaptando una cuba para secar lentamente el grano alimentado desde arriba y retirado por el fondo con una rosca barredora. El secado de grano es un área activa de investigación y desarrollo.[6]

1.5. Principios técnicos del secado

Básicamente, el secado consiste en retirar por evaporación el agua de la superficie del producto y traspasarla al aire circundante. La rapidez de este proceso depende del aire (la velocidad con la que éste circule alrededor del producto, su grado de sequedad, etcétera), y de las características del producto (su composición, su contenido de humedad, el tamaño de las partículas, etcétera). El aire contiene y puede absorber vapor de agua. La cantidad de vapor de agua presente en el aire se llama humedad. Un aire absolutamente seco, sin vapor de agua en su interior, contiene una humedad relativa de 0%, mientras que uno saturado de agua tiene una humedad relativa de 100%. La cantidad de vapor de agua que el aire puede absorber depende, en gran medida, de su temperatura. Existen cuadros que permiten calcular la cantidad adicional de vapor de agua que el aire puede absorber a una temperatura y una humedad relativa determinada. A medida que el aire se calienta, su humedad relativa decae y, por tanto, puede absorber más humedad. Al calentarse el aire alrededor del producto, éste se deshidrata más rápidamente. [7]

El secado es una de las técnicas más antiguamente utilizada para la conservación de alimentos. El secado al sol de frutas, granos, vegetales, carnes y pescados ha sido ampliamente utilizado desde los albores de la Humanidad proporcionando al hombre una posibilidad de subsistencia en épocas de carencia. Hoy en día la industria de alimentos secado constituye un sector muy importante dentro de la industria alimentaria extendido por todo el mundo. El tamaño de las instalaciones varía desde simples secadores solares hasta grandes y sofisticadas instalaciones de secado. En el mercado puede encontrarse una amplia variedad de productos secados (vegetales, frutas, carnes, pescados, cereales y productos lácteos) o formulados a partir de ingredientes secados como es el caso de las salsas y sopas en polvo.[8]

1.6. Técnicas de secado

1.6.1. Secado anterior a la trilla

El paddy (arroz con cáscara), una vez cosechado, deber ser trillado, la trilla es a veces realizada en una operación combinada con el corte, en el caso de la cosechadora. En otros casos, se procede, entre la cosecha y la trilla, a un secado previo del paddy no desprendido de la panícula. El secado previo es siempre natural. Se realiza en uno o varios tiempos, en el campo sobre la era de secado, o en el interior de los edificios de la granja.

Los métodos de secado antes de la trilla

Estos métodos están limitados por la naturaleza propia del material vegetal a secar; se diferencian unos de otros, concretamente, en función:

- De las condiciones geográficas y climáticas especialmente.
- De las condiciones demográficas, y especialmente de las posibilidades humanas.

Los métodos de secado en función de las condiciones geográficas.

El secado más simple consiste en depositar los haces sobre el rastro que queda después del corte, o sobre las ataguías o al lado del camino. Después de cierto tiempo de secado, los haces o las gavillas son transportadas para la trilla, o bien son dispuestos en hacinas o apilados para una segunda fase de secado.

El simple secado en haces o en manojos, o en cambas para colocarlos después en pilas o almiares es de lo más corriente (India, Pakistán, Malasia, Tailandia, Sumatra, etc.). La duración de secado varía naturalmente en función de la época de la cosecha y de las condiciones climáticas que prevalecen después: tres o cuatro días cuando la cosecha es efectuada al final de la estación de las lluvias o al principio de una temporada seca muy marcada, más aún cuando la cosecha se ha hecho durante períodos menos lluviosos, pero no absolutamente secos: a veces las gavillas son giradas en curso del secado; son notables las modalidades de secado en Madagascar, donde las gavillas están generalmente dispuestas en líneas sobre el campo, con las panículas de una gavilla situadas debajo de las pajas de gavilla siguiente; quedan así unos diez días y son transportadas a la era de secado o al lugar de la trilla, o dispuestas den montones de espera.

El contacto de las gavillas, y más particularmente de las panículas con la humedad del suelo del arrozal, incluso con el agua que puede aún existir si el drenaje no es perfecto, presenta graves inconvenientes: conservación de la humedad de granos, desarrollo posible del moho, formación ulterior de granos amarillos hasta germinación de los granos sobre todo si las lluvias continúan o sobreviven; al contrario, los cultivadores de arroz reconocen a veces que esta práctica permite obtener granos de un peso volumétrico más elevado.

En muchos caos, después de esta primera fase de secado, y sobre todo cuando la trilla se difiere, o es efectuada a medida de las necesidades, se procede a una segunda fase de secado:

- Colocación en pequeños montones, por yuxtaposición panículas contra panículas, las hacinas se levantan verticalmente en forma de conos (Vietnam del Sur, por ejemplo).
- Apilado o en montones paralelepípedicos de diversos tamaños pequeños muros de 2 m x 1 m x 1,5 m de alto en el Vietnam del Sur, por ejemplo; montones de 5 m de ancho y de 4 m de alto en Ceilán, etc.

En Japón el secado de la trilla es siempre objeto de cuidados muy meticulosos: las plantas cortadas se reúnen en gavillas, atadas en manojillos con un lazo de paja o de cuerda de paja de arroz. Las cambas pueden ser dejadas en el suelo para secar durante varios días antes de ser astadas en gavillas, o bien pueden ser transportadas inmediatamente para un secado temporal, o en el patio de granja donde los haces se colocan derechos con las panículas arriba la base de la paja muy separada o sobre caballetes alineados o lo largo de las carreteras, de los senderos, entre los campos o frente los edificios. Existe toda una gama de caballetes: los más sencillos están constituidos por pértigas sostenidas horizontalmente por trípodes situados a determinadas distancias, los pequeños manojos atados por la base son suspendidas con las panículas hacia abajo. En ciertos distritos, se utilizan perchas formadas cada una por una pértiga vertical de 2 m de alto a la cual está ligada, a 0,50 m del suelo, un travesaño de madera de 0,60 m, más o menos; sobre este travesaño se colocan las haces con las panículas hacia el exterior, sobre una altura de 1,50 m a 2 m; los manojos son colocados sobre estos diversos caballetes durante dos semanas aproximadamente, ya que un secado más rápido ofrece riesgo de deteriorar el grano; se estima en Japón que el secado sobre caballetes durante diez días permite el grano perder del 10 al 12 % de humedad (de 20 a 25 % al origen de 13 a 14 % después de un secado gradual).

En numerosos países, la práctica de la colocación en pequeños manojos de panículas, provistas de una porción de tallo de 20 a 30 cm de largo, está ligada a la imposibilidad de efectuar el secado de la cosecha en campo, es el caso en Pakistán

y en ciertas partes de la India para el de campanas de otoño y de primavera , donde la cosecha se efectúa en agua que aun no se han escurrido, o durante el mozn: los pequeños haces o manojos son transportados a la granjas en muchas regiones de Indonesia (en Java), en la República Democrática del Vietnam, sobre todo en lo que respeta a la campana del quinto mes lo mismo que para algunos arroces cultivados en terrenos sumergidos.

En los países Extremos Oriente, de muy elevada densidad demográfica, todos los procedimientos de secado en el campo antes de la trilla puede ser utilizados, mientras que en los países de cultivo extensivo: EEUU, Francia, etc. La escasez de mano obra y su carestía obligan a la adopción de métodos rápidos de corte sin secado en el campo, de ahí la generalización de la cosechadora; es la solución adoptada igualmente en las grandes zonas revalorizadas del África tropical (Senegal, Oficina del Níger o Mali, etc.) o de América ecuatorial (Surinam, Guayan británica.)

El hacinamiento y la puesta en haces o en montones exigen una mano de obra calificada y abundante pero es en Japón donde el secado anterior a la trilla, sobre caballetes o sobre perchas, exigen mano de obra considerablemente, tanto para levantar los caballetes y perchas como para efectuar los transportes y colocar los haces.

1.6.2. Secado después de la trilla

La trilla, efectuada manual o mecánicamente, puede hacerse inmediatamente después del corte sin secado previo (es el caso de la cosechadora) o después del secado de las panículas, provistas de una porción más o menos grande de tallo, o sin él.

El secado es necesario para la conservación ulterior del grano, y se trata de grano destinados a la siembra; tiene por objetivo situar los granos en estado de equilibrio con el aire ambiente; este equilibrio se logra solo después de un tiempo muy largo, que varía en función de diversos factores ambientales: temperatura y humedad del

aire cercano, duración de secado, etc. Un buen secado debe situar el grano entre el 12 y el 14 % aproximadamente de humedad, en una atmósfera ambiente del 50 al 75 % de humedad relativa.

En esta fase, después de la trilla el secado puede ser complementario del secado anterior a la trilla o total.

El secado debe permitir la obtención de granos que se conservan el mayor tiempo posible sin pérdidas sensibles de sustancias, sin alteración de sus componentes y de su valor nutricional, ni transformación de calidad organolépticas. Además, el secado debe permitir la obtención de más altos rendimientos en molinería e industrialización y el más elevado porcentaje posible de granos enteros, ya que las roturas reducen el valor comercial de los productos industrializados.

El secado previo puede ser efectuado según tres métodos:

- Secado natural
- Secado artificial al aire ambiente (no calentado)
- Secado artificial por vía térmica (por aire caliente, por infrarrojos, etc.)
 - a) Secado natural

El secado natural después de la trilla es el método más corrientemente utilizado en los países de cultivo tradicional.

Una vez trillado el paddy y más o menos húmedo, según que haya sido o no secado antes de la trilla es dispuesto sobre esteras (de paja o de bambú), incluso sobre harneros cuando se trata de pequeñas cantidades, o dispuestos sobre eras de secado cuando las cantidades a secar son importantes, las eras de secado son de tierra apisonada, cubiertas de ladrillos, o bien cementadas.

La práctica del secado natural ha sido objeto de numerosos ensayos que han permitido fijar las modalidades técnicamente óptimas pero los imperativos económicos, de mano de obra en particular, no siempre permiten su adopción.

En principios, el secado debe ser efectuado a la sombra y en la medida de lo posible, resguardado de la lluvia; en el caso de lluvia accidental, el mojado debe ser secado a la sombra.

❖ Secado al sol.

Entre métodos de secado natural el secado al sol es el más usado en el mundo. En algunos países, los cultivos se secan extendiéndolos sobre los caminos, en las playas o en los techos de las casas, aprovechando el calor absorbido por estas superficies. Muchas veces se usan las rocas planas con el mismo propósito. Con frecuencia el material se coloca sobre esteras, lo que contribuye a reducir la contaminación causada por el polvo y facilita la manipulación.

Estos simples métodos de secado tienen algunas ventajas:

- Prácticamente no requieren de ningún costo adicional, ya que no utilizan combustible.
- No necesitan estructuras permanentes, lo que permite que después de la estación de secado, el terreno quede disponible para la agricultura o para otros fines.

Pero también tienen muchas limitaciones:

- La pérdida de humedad puede no ser constante, ya que depende del clima.
- El secado es muy lento y a menudo el producto no llega a secarse completamente en un solo día, por lo que debe permanecer expuesto durante toda la noche para finalizar su secado al día siguiente. Esto aumenta el riesgo de deterioro, en especial debido al desarrollo de hongos.

- Los niveles finales de humedad que se alcanzan no son lo suficientemente bajos, lo que aumenta las posibilidades de deterioro del producto durante el almacenado. En otras ocasiones, el producto alcanza niveles de secado superiores a los límites recomendables.
- El producto está expuesto a la contaminación por el polvo y la suciedad y a la infestación por insectos.
- Se requiere de mano de obra adicional para extender el grano, voltearlo y recogerlo cuando hay riesgo de lluvia.
- Los granos pueden adquirir un color oscuro y el nivel de ciertos nutrientes, particularmente las vitaminas, puede disminuir por la exposición directa al sol.[9]



Figura 1.2: Secado al sol.

b) Secado artificial al aire ambiente (no calentado)

Esta muy generalizado el secado artificial del por medio de una corriente de aire (no calentado), cuyo caudal y las modalidades que varían con las condiciones de secado, esta solución es, en efecto atrayente, porque economizar la instalación de un aparato de calentar el aire y de su funcionamiento. Las modalidades de secado

por aire ambiental varían en función de numerosos factores, y especialmente del nivel de humedad inicial del grano y de la humedad relativa del medio ambiente durante el secado. La humedad relativa del aire varía en el curso del día, e igualmente de un día para otro, durante el período de secado; por otra parte, para un mismo período anual, la humedad relativa es diferente de un año a otro.

Las humedades relativas medias durante del período de secado del 72 % en Texas (más del 80% durante más de un cuarto del período considerado) y 80,6 % en Vietnam, permiten en todos los casos una reducción sensible del contenido en humedad por ventilación del paddy; pero el aprovechamiento de un aire relativamente seco, o más exactamente la limitación de la ventilación a los períodos en que la humedad relativa del aire es más débil, permite en ciertos casos obtener un secado más rápido que por ventilación continua, la duración es tanto más corta cuando la humedad inicial es más baja y los volúmenes de aire utilizados más elevados. Exponemos los de Texas (Tablas 1.1 y 1.2).

Es preferible la ventilación continua a la ventilación alternante para secar el paddy con porcentaje de humedad inicial relativamente elevado; sin embargo, en un caso como en otro, debe pararse la ventilación cuando el tiempo es lluvioso o brumoso; si los períodos lluviosos pasan de 24 horas, se recomienda mantener la temperatura del paddy ventilándolo solamente de 2 a 3 h. por día.

La marcha de la ventilación alternante en la Camarga demuestra que es importante que la cadencia de la ventilación sea reducida a medida que se sea acerca del porcentaje de humedad final. El caudal de aire enviado a la masa depende, no solo del espesor de la capa de a secar sino también de la humedad inicial del mismo.

Tabla 1.1: Realización de secado artificial por ventilación alterante.

Porcentaje de humedad inicial (%)	Espesor del <u>paddy</u> (m)	Modalidades del secado
20 a 22	1,80	Cuando la capa superior se ha reducido a 16 % de humedad, se puede añadir.
16 a 20	2,40	Cuando la capa superior se ha reducido a 15 % de humedad, se puede añadir a 16 % de humedad como máximo hasta 3 m de espesor.

Tabla 1.2: Realización de secado artificial (Texas).

Caudal de aire (l/mm/q)	Humedad inicial del (%)	Porcentaje de humedad final (porcentaje MF)	Número de horas de ventilación para reducción de la humedad del grano al porcentaje final	
			Ventilación continua	Ventilación alternante, H. relativa < 75%
Relativamente seco desde el comienzo:				
394	13,8 a 14	11,6	265	95
266	14,5 a 14,7	11,8	270	183
132	14,4 a 14,7	12,4	270	210
Relativamente húmedo desde el principio:				
378	13,8	12,6	10 d	15 d
252	18,5 a 19,3	13,5	10 d	21 d
120	18,8 a 19,8	15,0	16 d	27 d

La realización del secado por aire ambiental está ahora a punto en climas templados o subtropicales; reproducimos a continuación las recomendaciones formuladas en este sentido como conclusión de los estudios efectuados en la estación arrocera de Beaumont (Texas):

Secar un paddy conteniendo las menos impurezas posibles y llenar los silos o células de secado de forma homogénea, salvo indicación contrario, llenar los silos con un espesor máximo de 3 m si el paddy tiene una dosis menor del 18 % de humedad y 2,40 % si el paddy tiene una dosis de más del 18 % escoger un material de ventilación tal que pueda producir un caudal de aire por lo menos 270 l/min. Por quintal y mejor cerca de 360 l/min, hacer funcionar el ventilador tan pronto sea posible después que los conductos de aeración hayan sido uniformemente cubiertos de enviar continuamente aire a través del paddy, salvo durante los períodos de humedad relativa muy elevada de más de 24 horas; durante estos períodos, se ventila de 2 a 3 h. por día, con el fin de evitar el calentamiento del paddy, y esto hasta que las condiciones climáticas vuelvan a la normalidad. Continuar así hasta que la humedad de la capa superior de la paddy sea solo del 16 % de humedad, enviar entonces el aire a la masa solo cuando la humedad relativa del aire ambiente sea del 75 % al menos. Cuando el porcentaje de humedad de la masa es solo del 14 % o menos, se da marcha inversa al ventilador y se aspira por abajo el aire a través de la masa hasta que el nivel de humedad baje a menos de 13,5 % (12 % para la conservación durante seis meses), en todo el silo; la aspiración del aire no debe ser ejecutada más que cuando la humedad relativa del aire ambiente sea del 75 % todo lo más, por fin, durante el almacenamiento, se debe proceder a la aeración del paddy por aspiración del aire a través de la masa, cuando la temperatura del aire ambiente es al menos de 5 a 5,5°C inferior a la temperatura media del paddy y cuando su humedad relativa es igual o inferior 80%.

Estas indicaciones muestran claramente que si el secado por aire ambiente (no calentado) constituye una solución atrayente por su sencillez, es largo y supone

condiciones climáticas particulares y, en todos los casos, la necesidad de tener en cuenta estas condiciones de humedad relativa y de temperatura y de sus variaciones para efectuar el secado.

Tipos de instalaciones y materiales a utilizar

Haciéndose el secado en el recinto donde se encuentra el paddy almacenado, la instalación debe comprender:

- Un recinto para el almacenamiento.
- Un dispositivo de ventilación, con preferencia reversible, permitiendo insuflar o aspirar el aire.
- Un sistema de canalizaciones permitiendo la distribución del aire en la masa o su aspiración.

El local de almacenaje puede ser cualquiera, redondo, metálico o alargado (tipo Quinset), con la única condición de que las paredes sean impermeables al aire o a la humedad.

La ventilación está asegurada por un ventilador centrífugo de aletas curvadas hacia delante o hacia atrás, solución que presenta la ventaja de autolimitación de la potencia desarrollada, o por un ventilador.

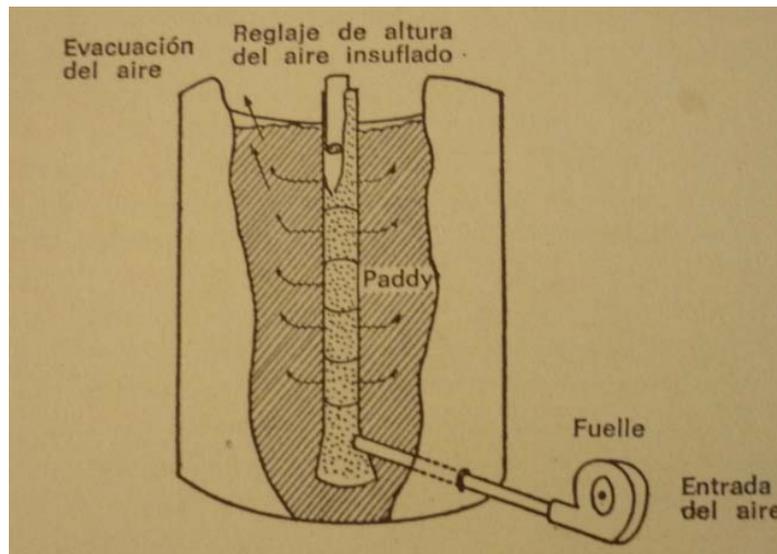


Figura 1.3: Secado artificial en silos por ventilación del aire ambiente (por conductor central).[10]

De modelo axial con o sin compuerta auxiliar. Los ventiladores de modelo axial son más baratos que los ventiladores centrífugos. Para el secado total del paddy sobre un espesor de 2,40 a 3 m el ventilador debe poder suministrar de 300 a 400 l de aire por minuto y por quintal bajo una presión estática de 7,5 a 10 cm de agua. Un caudal total de 750 m³ de aire por minuto exige una potencia de unos 15 HP (11,19kW).

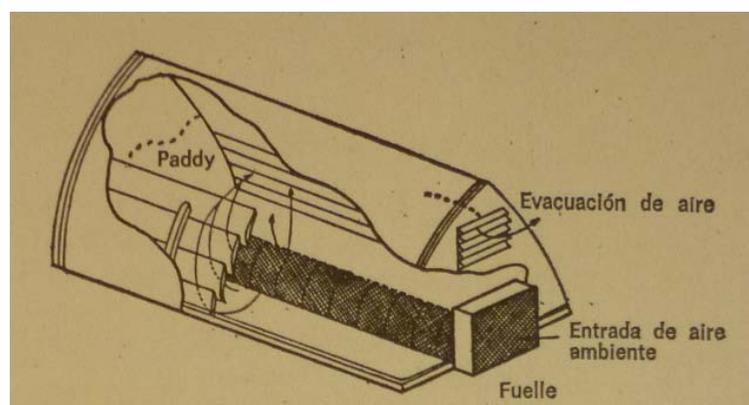


Figura 1.4: Unidad alargada de almacenamiento y secado por aire ambiente (tipo Quinset) (según Angledette F.A.O).[10]

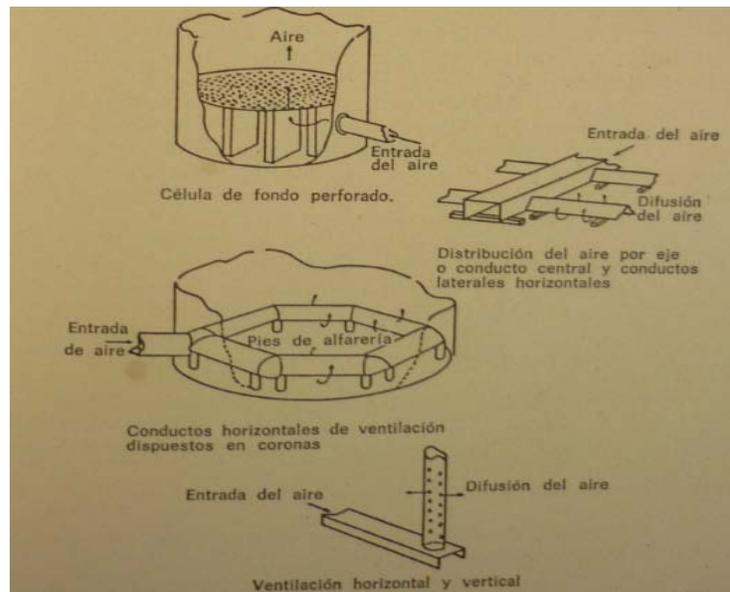


Figura 1.5: Sistemas de distribución de aire ambiente para secado artificial (según Angladette F.A.O).[10]

La distribución del aire se hace por piso perforado (para pequeñas cantidades). Por conducto central horizontal (para células alargadas), por conducto central y ramas laterales horizontales (el sistemas más conocido porque se adapta a todas las células y todos los espesores) o en fin por conductos verticales.

c) Secado artificial por vía térmica

El secado por aire ambiente, del cual se ha tratado, se basa esencialmente en la acción evaporante debida a la corriente de aire sobre el húmedo, cuya agua se evapora si las condiciones exteriores lo permiten o lo favorecen, en definitiva, este modo de secado depende del movimiento del aire y de su humedad relativa, la temperatura de este aire juega un papel relativamente secundario.

En ensayos relativamente recientes, se ha tratado del secado por vía dieléctrica (permitiendo una gran uniformidad de secado) o por radiaciones infrarrojas (permitiendo un secado rápido y obteniendo una acción pesticida caracterizada) pero el método más corrientemente empleado es el secado por aire caliente, este método

es apropiado cuando el porcentaje de humedad inicial del grano es muy elevada y cuando se debe almacenar muy rápidamente en las mejores condiciones posibles; es un procedimiento particularmente recomendado en el caso del recolectado con cosechadora.

El secado con aire caliente no se efectúa en el recinto de almacenamiento sino en un secador independiente, por el cual circula una corriente de aire caliente a través de la masa del arroz húmedo. El calor del aire suministra la energía necesaria para la evaporación y favorece al mismo tiempo el mantenimiento en el interior del grano de una tensión de vapor superior a la que existe en el exterior; esta diferencia de tensión condiciona extraordinariamente la cantidad de humedad que pasara del interior hacia el exterior del grano así como la rapidez de este pasaje. El aire caliente suministra, además, un medio de expulsar el vapor de agua liberado por evaporación en función de temperatura de este aire caliente.

El secado térmico puede ser efectuado de dos formas:

- Secado del amontonado, esencialmente utilizado industrialmente:
- Secado del en sacos, esencialmente utilizado para el secado de las semillas.

- Secado del arroz amontonado

Los secadores utilizables son de varias categorías, según que el paddy sea removido o no en el curso del secado: Secadores sin manipulación o removiendo de los granos, son más sencillos; pueden ser verticales u horizontales.

En el secador vertical (fig.1.6), el paddy baja entre las dos paredes interior y exterior de una caja anular cilíndrica, troncocónica o prismática, el aire caliente, enviado de abajo hacia arriba de la cámara central vacía, se evacua a través del paddy que baja. En la parte inferior del secador, un mecanismo permite evacuar el paddy secado más o menos rápidamente, y regular así el caudal de bajada. Los secadores verticales

son de dimensiones muy variables 4 m de alto los más corrientes, pero frecuentemente los más interesantes; pueden colocarse en batería.

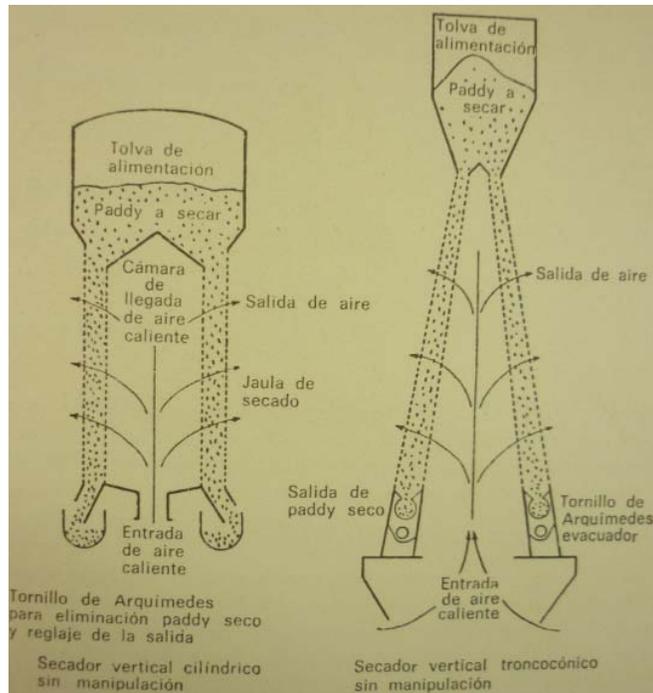


Figura 1.6: Secado del sin manipulación de granos.[10]

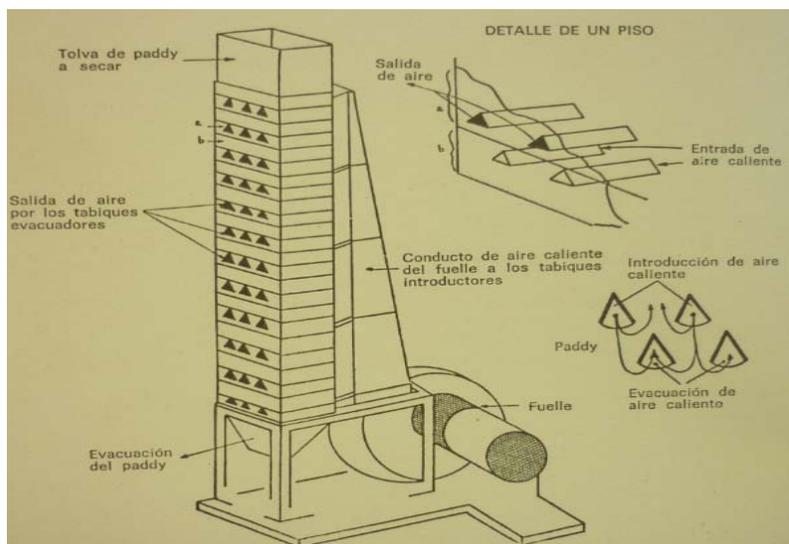


Figura 1.7: Secador vertical tabicado (según Angladette F.A.O).[10]

- Secado en sacos

El secado en sacos es esencialmente utilizados para las semillas con el fin de evitar las mezclas de variedades y de conservar sus características de pureza, poder germinativo, etc.

El principio es sencillo: se disponen los sacos en plano, unos al lado de otros, en una sola capa sobre una plataforma perforado; el aire es insuflado bajo esta bandeja, y por cada perforación pasa a través de los sacos y seca el contenido; todo se encuentra en un recinto cerrado, a menudo en forma de túnel. El aire es calentado por un hogar constituido por quemadores de fueloil o de gas natural, el impulsado por un potente ventilador (fig. 1.8). [10]

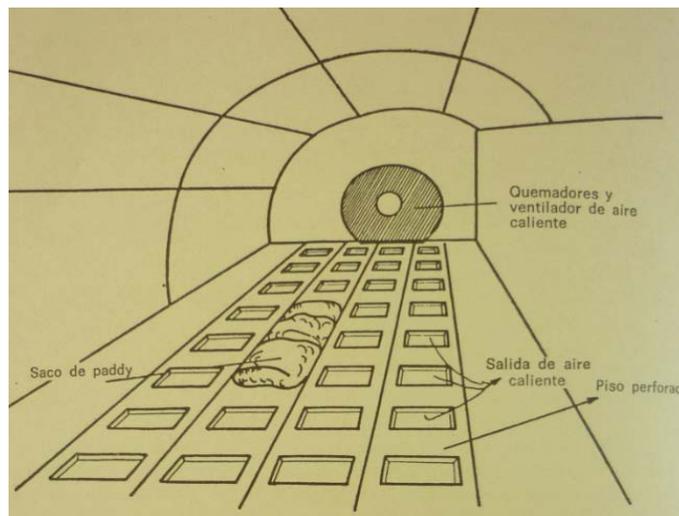


Figura 1.8: Secado de sacos (según Angladette F.A.O).[10]

1.7. Descripción de un secador.

Lo que llamamos “secadero” es en realidad una instalación compleja donde la instalación de secado propiamente dicha no abarca un espacio físico importante.

Por lo general, podemos observar, siguiendo el arroz desde su entrada hasta su salida:

- Una pesa sobre la que las carretas pasan para conocer la cantidad de arroz que entra al secadero.
- Una tolva de recepción, enterrada y cubierta por una rejilla, donde se vacían las carretas.
- Un pequeño laboratorio con un aparato para la medición del grado de humedad del arroz a la entrada y en el curso de proceso.
- Una zaranda de limpieza, destinada a separar del arroz los residuos de la cosecha (paja, granos vanos, impureza, semillas de malas hierbas, etc.)
- Una torre de desecación con una tolva superior, un ventilador y un quemador de petrolero (o una instalación de secado continuo).
- Varios silos de reposo para conservar el arroz entre dos pases sucesivos por la torre de secado.
- Una serie de aparatos de transporte y elevación (con un sinfín o correa y cucharas), para llevar el arroz desde la tolva de recepción a través de su recorrido por los distintos aparatos de limpieza, secado y almacenado de reposo.
- Un silo final, donde se lleva el arroz seco, provisto, en la parte inferior, de un embudo especial para el llenado de sacos (en el caso de almacenado en sacos). Los sacos se cosen a mano o mecánicamente.
- Un almacén para conservar el arroz seco que puede ser
- Una serie de silos, el del caso de la conservación del arroz a granel.

- Una nave para la conservación en sacos (con celdas en caso de conservación a granel).[11]

1.8. La calidad del secado

La calidad es uno de los atributos que comienzan a pesar de forma creciente en el concepto amplio de productividad de la producción agrícola. Cada vez más los consumidores están más conscientes del valor de la calidad de los granos, y pueden remunerar mejor los productos con más calidad o simplemente no adquirir productos con calidad comprometida. Esto es válido para el arroz, donde se toman en cuenta el porcentaje de granos enteros, el color y la apariencia, la calidad de secado es considerada alta si se mantienen en el grano:

- Sus componentes sin alteración.
- Su valor nutritivo.
- Sus cualidades tecnológicas (rendimiento industrial y porcentaje de granos enteros)
- Su poder germinativo.

Esto se consigue si se lleva la humedad del grano a un equilibrio con la humedad del aire ambiente, que se alcanza de manera variable según la temperatura y humedad del aire, el tiempo de secado, etc.

Prácticamente se debe llevar la humedad del grano a un 12-14% para conservarlo en una atmósfera de 50 a 75 % de humedad relativa.

El nivel de proteína en granos de arroz se relaciona con la temperatura de secado, en cualquier circunstancia la temperatura de flujos del aire no puede superar de 60° C. Además un buen molino depende mucho de la temperatura a la que arroz se seca.

1.9 Fuentes energéticas

A pesar de que los sistemas de secado están en constante evolución, ya está alcanzando el límite en lo que se refiere a la eficiencia en el consumo energético. Siendo así, la elección del combustible o fuente térmica es importante. Se debe considerar la disponibilidad, el costo (en \$ por unidad de energía térmica generada), el costo de la instalación y la calidad del aire de secado producido. Cada región y cada aplicación tienen la fuente más adecuada. Productos que no pueden ser contaminados con humo o por óxido de nitrógeno, pueden demandar calentamiento con gas o calor indirecto, respectivamente. No existe por lo tanto una fuente de calor ideal, en cada caso es preciso aplicar la más adecuada.[12]

Por todo lo expuesto anteriormente se considera que en nuestro país las principales fuentes para ser utilizadas en el secado de arroz sustituyendo los combustibles fósiles son: cogeneración con motor alternativo, biomasa y solar.

A continuación se mostrarán las fuentes posibles para el secado de arroz:

1.9.1 Cogeneración con motor alternativo

Estos sistemas utilizan motores alternativos de combustión interna, de gasolina, gasoil, fuel oil o gas. El combustible mezclado con aire en la proporción adecuada y a una presión y temperatura establecidas provoca, mediante energía liberada genera una fuerza motriz, que puede accionar un generador eléctrico u otro equipo. El nivel de temperatura que es posible recuperar del calor residual de los gases de escape o del agua de enfriamiento de los motores los hace particularmente indicados para su aplicación en sistemas de climatización y calentamiento.

1.9.2 Biomasa

Un residuo agrícola que puede ser utilizado en un gran número de países y en Cuba para cubrir sus necesidades de energía es la cáscara de arroz, debido a su razonablemente elevado contenido de energía.

Grandes cantidades de cáscara de arroz se generan anualmente como el mayor subproducto de los molinos industriales. La producción anual mundial de arroz está alrededor de 500 millones de toneladas y asumiendo que el 20 % sea cáscara, la producción anual mundial de cáscara de arroz es de aproximadamente 100 millones de toneladas. A pesar de la tendencia al incremento del sobrante de cáscara de arroz, los métodos propios para su utilización tienen que ser aún desarrollados. Hoy día, la mayor parte del excedente de cáscara de arroz se destruye o elimina por medio de la combustión a cielo abierto, lo cual resulta en pérdidas de energía (calor), así como también en la emisión de varios contaminantes hacia la atmósfera. Sin embargo, muchos países tienen implantados nuevas regulaciones para limitar la quema de la cáscara de arroz en el campo, principalmente por razones ambientales. Esto trae como consecuencia un mayor interés en utilizar la cáscara de arroz como una fuente de energía renovable.[1]

La industria arrocera genera anualmente grandes volúmenes de biomasa combustible, constituyendo la cascarilla de arroz la tercera fuente de energía primaria a nivel mundial, después del fuel-oil y el carbón. La energía liberada durante la combustión de la cáscara de arroz puede llegar a sustituir el uso del gas oíl como combustible básico en el Proceso de Secado Industrial del arroz.

1.9.3 Energía solar

La energía solar se presenta como una alternativa eficiente y barata en comparación con las formas tradicionales de suministro de energía (electricidad, gas y otras) para las zonas rurales y soleadas. El proceso de urbanización, el desarrollo económico y los requerimientos de una población en constante crecimiento requiere que muchos productos agrícolas sean procesados a través de tecnologías que pueden ser

tradicionales, artesanales o de punta en agroindustrias pequeñas, medianas o grandes.

La pequeña agroindustria es la que opera a nivel rural, empleando tecnologías simples y tradicionales. El procesamiento se hace en forma manual y con un equipo mínimo, como ejemplo podemos citar el secado solar de frutas y hortalizas.

Como sería muy extenso para este trabajo de diploma estudiar las tres fuentes anteriormente señaladas, es por lo que se escoge la utilización de la cogeneración con motores de combustión interna de las Centrales Eléctricas de la Generación Distribuida en nuestro país y la cáscara de arroz.

Capítulo 2: Análisis de uso de fuentes de energías renovables o residuales en el secado de arroz.

En Cuba los grupos electrógenos desempeñan un papel importante en la producción eléctrica. Según el reporte de la Oficina Nacional de Estadísticas sobre la electricidad en Cuba, en nuestra provincia en el año 2009 funcionaban 90 grupos electrógenos y este número se elevó a 97 en 2010. Estos grupos entregan a la red eléctrica nacional una potencia de 177,7 GW.[13] Se debe tener en cuenta que al producir electricidad los motores de combustión interna también generan calor. Tradicionalmente este calor se expulsa al ambiente junto con los gases de combustión, la crisis energética actual obliga a los consumidores a prestar atención a esta energía residual. Debido a la gran perspectiva de aprovechamiento que tiene esta fuente de energía, se va a analizar su capacidad en el secado de arroz.

Otra alternativa para el secado puede ser la cascarilla de arroz, pues ésta se encuentra siempre disponible en el lugar de producción de arroz y no se le ha dado la consideración que este material merece en el sentido de un combustible alternativo. En Cuba hay lugares donde no existe posibilidad de usar energías convencionales y se necesitan investigaciones a fin de encontrar soluciones a este problemática. Por esta razón es pertinente investigar la capacidad de secado que la cascarilla de arroz puede aportar.

2.1 Análisis de uso de la energía residual de los Grupos Electrónicos

2.1.1 Análisis de los indicadores del consumo energético

Según el trabajo realizado por un grupo de investigación en la CPA “Gilberto León” de la provincia La Habana los índices de consumo energético para el secado de arroz son de 9,1 l/ton de fuel oíl y 79,89 kWh/ton de electricidad.[14]

Se cuenta también con el experimento realizado por los profesores Dr. Alfredo Curbelo Alonso y la Dra. Bárbara Garrea Moreda, que pertenecen a la División de Industria y Energía y a la Agencia de Ciencia y Tecnología de Cuba. Según estos autores los índices de consumo energético para el secado de una tonelada de arroz son 20kW-h en la ventilación y 14kg de fuel oíl en el calentamiento. [15]

Otra fuente de información sobre el consumo energético de secado del arroz es el trabajo titulado “Comportamiento de los índices de consumo energético en la industria arrocera en la provincia cubana de Granma”, realizado por Edilberto Antonio Llanes Cedeño, profesor de la Universidad de Granma, en el cual el consumo de energía eléctrica por tonelada de arroz es de 18,24kW-h y el consumo de energía térmica es de 9,78 kg fuel oíl. [16]

	Datos obtenidos en la CPA “Gilberto León” de La Habana	Datos obtenidos por los profesores Dr. Alfredo Curbelo Alonso y Dra. Bárbara Garrea Moreda (HR 23 %)	Datos obtenidos por Edilberto Antonio Llanes Cedeño (HR19 %)
Indicador de consumo eléctrico (kW-h/t)	79,89	20	18,24
Indicador de consumo de <u>fueloil</u> (kg/t)	9,1	14	9.78
Indicador de consumo energético total en (kg/t) <u>fueloil</u>	25,34	18,1	13,51

Tabla 2.1: Comparación de los resultados anteriores

En los siguientes cálculos se utiliza el resultado del Dr. Alfredo Curbelo Alonso y la Dra. Bárbara Garrea Moreda, debido a que el arroz usado para sus experimentos tiene una humedad inicial del 23 %, ésta es el valor promedio de humedad del arroz cubano.

2.1.2 Análisis de los grupos electrógenos.

El calor que se arrastra por los gases de escape en un motor Hyundai de 1,7MW durante una hora es:

$$Q_g = P * t = 1320kW * 1hora = 1320kWh \quad [2.1]$$

Q_g Se calcula también a través de la fórmula:

$$Q_g = m_g c_g (t_g - t_o) \quad [2.2]$$

Donde:

m_g : (kg/s) es flujo de masa de los gases

c_g : (J/(kg. ° C) Calor específico de los gases

t_g : (° C)Temperatura de salida de los gases

t_o : (° C)Temperatura de ambiente

Se ha conocido que la temperatura de secado oscila entre 45 y 55 ° C, se supone que el secado se realizará a 50 ° C.

Ahora bien, los gases que normalmente salen de los tubos de escape tienen temperatura de 300 a 400 ° C. Es necesario disminuir esta temperatura a 50 ° C para lograr un buen secamiento, al disminuir de 350 ° C a 50 ° C, los gases ceden energía, vamos a llamarle a esta cantidad de energía el calor disponible para el secado.

$$Q_{disponible} = m_g c_g (t_g - t_{sec}) \quad [2.3]$$

$Q_{disponible}$: Es la cantidad de energía que se obtiene al disminuir la temperatura de los gases de 350 a 50 °C en kJ

t_{sec} : Temperatura de secado en °C

Si la temperatura del ambiente es $t_o = 29^{\circ}C$ [17]

$$Q_g = m_g c_g (350 - 29)$$

$$Q_{disponible} = m_g c_g (350 - 50)$$

$$\frac{Q_{disponible}}{Q_g} = \frac{m_g c_g (350 - 50)}{m_g c_g (350 - 29)} = \frac{300}{321} = 0,94 \approx 94\%$$

El calor disponible para el secado es

$$Q_{disponible} = 1320 * 0,94 = 1240 kWh = 4466 MJ$$

Al quemar 1kg de combustible fuel oíl se produce 38 MJ de energía en forma de calor[18].

Entonces si se quema X kg de combustible fuel oíl se produce 4466 MJ de energía en forma de calor.

$$X = 117 \text{ kg}$$

El calor disponible de los gases de escape durante una hora es igual al calor producido cuando se quema 117kg de fuel oíl.

Se había tomado como índice promedio del consumo energético para el secado de arroz. Al secar una tonelada de arroz se necesita 20 kW-h y 14 kg de fueloil.

Si en vez de quemar combustible se utiliza el calor de los gases de escape, la cantidad de arroz secada es

$$\frac{117}{14} = 8,3ton$$

La energía de ventilación para esta cantidad de arroz secado es $20 * 8,3 = 166kWh$

En resumen, si se utiliza energía de los gases de escape de los GE para el secado de arroz durante una hora junto con 166 kW-h de electricidad se pueden secar 8,3 toneladas de arroz.

2.2. Análisis del uso de cascarilla de arroz como combustible para secado de arroz

2.2.1 Producción de cascarilla de arroz (CA)

Tradicionalmente la cascarilla de arroz se destruye o elimina por medio de la combustión a cielo abierto y esto ha significado una pérdida de energía, pues la práctica ha mostrado que la cascarilla puede ser utilizada para muchos usos, por ejemplo como combustible, como un material en la construcción, también como sustrato en hidroponía. Además, el no aprovecharla trae como consecuencia la emisión de varios contaminantes hacia la atmósfera. Actualmente, en los países que tienen grandes producciones de arroz, se utilizan equipos modernos diseñados a fin de aprovechar energía de este subproducto y proteger al medio ambiente.

La producción anual de arroz en Cuba alcanza alrededor de 300 mil toneladas. Asumiendo que la cascarilla de arroz ocupa el 20 % de su peso, la producción anual de cascarilla de arroz sería de 60 mil toneladas. Debido a la pequeña escala de producción de arroz, el aprovechamiento de cascarilla de arroz sigue teniendo poca atención, pero realmente esta podría ser una solución para el enfrentamiento de la crisis de petróleo y podría resolver la demanda de secado de arroz que tienen los lugares lejanos donde no hay disponibilidad de fuentes de energía convencional.

2.2.2 Propiedades físicas de la cascarilla de arroz

a. Tamaño de la Cascarilla.

La longitud de la cascarilla depende de la variedad de arroz y está entre 5 y 11 mm. Su ancho es casi el 30-40% de la longitud y de acuerdo a su tamaño una cascarilla puede pesar entre 2,5 y 4,8 mg

b. Densidad de la cascarilla.

Se distinguen tres clases: Densidad a granel, densidad aparente y densidad específica de la cascarilla.

Densidad a granel: En muchas aplicaciones la rentabilidad de la utilización de la cascarilla depende en gran medida de los costos de transporte, los cuales a su vez están determinados por la densidad a granel de la misma. La densidad a granel es la masa de cascarilla que equivale a un metro cúbico. Se determinaron los siguientes valores:

- Cascarilla suelta, empacada a granel: 100 kg/m^3
- Luego de someter el recipiente a vibración: 143 kg/m^3
- Compactación al estrujarla con los pies: 180 kg/m^3

Al moler la cascarilla y según la finura de la harina, se obtienen densidades a granel entre 230 y 310 kg/m^3 .

c. Equilibrio del contenido de humedad.

En estado seco, la cascarilla absorbe agua hasta el punto en que se equilibren su propio contenido de agua y la humedad relativa del aire. Se han obtenido los siguientes valores promedio:

- Humedad relativa del aire (%): 40 60 80 90
- Contenido de agua de la cascarilla(%): 8.0 10.5 12.2 14.6

El contenido de agua se refiere al peso húmedo de la cascarilla.

2.2.3 Propiedades químicas de la cascarilla.

a. Composición química de la cascarilla.

El análisis químico de los elementos de más de 20 variedades diferentes de cascarilla de arroz arroja la composición que se presenta en la tabla 3.1.

TABLA 2.2.1. Composición química de la cascarilla.

Elemento	Carbono (C)	Oxígeno (O)	Minerales (Ceniza)	Hidrógeno (H)	Nitrógeno (N)
% del peso	39 - 42	32 - 34	14 - 24	4 - 5	0,3 - 2

Fuente: Uso racional de energía en molinos de arroz en Colombia. 1990. Ministerio de Minas y energía.

Si se analiza la cascarilla según los diferentes compuestos químicos, resulta la composición que se presenta en la tabla 3.2.

TABLA 2.2.2. Compuestos nutritivos en la cascarilla.

Compuesto	Proteínas	Grasas	Fibras	Celulosa	Hemicelulosa (Pentosanas)	Minerales (Ceniza)	Azúcar
% en peso	1,9-6,2	0,4-1,5	34,3-41,6	37,2-43,4	17,2-22,2	14,2-24,6	0,2-0,4

Fuente: Uso racional de energía en molinos de arroz en Colombia.1990. Ministerio de Minas y energía.

La gran variación del contenido de proteínas radica en una separación limpia entre cascarilla y película de aleurona. Como promedio realista debería asumirse un 3% de contenido de proteína.

b. Composición química de la ceniza

Las cenizas contienen en cuantía superior elementos silícicos y en muy pequeña proporción, óxido de calcio, magnesio, potasio y sulfatos. En la tabla 3.3 se presenta el análisis químico de la ceniza.

Tabla 2.2.3. Análisis químico de la ceniza de la cascarilla

Compuesto	Sílice	Oxido de Calcio	Oxido de Magnesio	Oxido de Potasio	Oxido de Sodio	Oxido fosfórico	Sulfato
% en peso	94,5%	0,25%	0,23%	1,1%	0,78%	0,53%	1,13%

FUENTE: Fabricación de tejas onduladas con cemento, ceniza de cascarilla de arroz y fibra-tex. Tesis UIS, 1997.

c. Poder calorífico de la cascarilla.

El poder calorífico de la cascarilla en relación con el peso en seco, varía entre 13.9 y 16.2 MJ/Kg. Las variaciones obedecen a diferentes contenidos de ceniza e impurezas producidas por la película aceitosa de la aleurona.

- Comportamiento calorífico de la cascarilla.

Debido al esqueleto de SiO_2 la cascarilla no quema bien. Al incinerarla completamente queda como residuo una ceniza blanca o rosada. Este es el caso normal cuando la cascarilla se quema lentamente a campo abierto, puesto que el oxígeno del aire tiene tiempo suficiente para llegar hasta el carbono adherido a los poros más profundos. En quemadores comerciales de cascarilla se produce por lo general una ceniza entre negra y gris. La manera de quemar la cascarilla depende en gran parte de que producto o subproducto se desee obtener.

Combustión abierta: La cascarilla de arroz es ignífuga en gran medida, debido a su esqueleto de SiO_2 . No se inflama fácilmente y quema mejor en presencia de un viento suave. Con la práctica ampliamente extendida en muchas regiones de Colombia de prender arrumes de cascarilla y dejarlos arder en forma continua durante todo el año, se producen cenizas de todos los matices de negro o blanco rosado.

Simultáneamente el volumen de cascarilla de arroz se reduce en un 60% como mínimo. Debido al lento proceso de combustión, cuando se quema a cielo abierto, es posible incinerarla en forma total. El proceso de combustión no puede controlarse y produce cierta tendencia al humo, cuando la temperatura cae por debajo de los 800°C , a causa de la lluvia o de un suministro deficiente de aire.

Naturaleza química de los minerales de la cascarilla antes y después de la combustión. La composición química de la ceniza presentada en la tabla (análisis químico) se refiere a valores de laboratorio. En la práctica y bajo condiciones muy favorables, se obtienen las composiciones típicas en quemadores de lechos fluidizado o de suspensión presentados en la tabla 3.4.

Tabla 2.2.4. Análisis químico de la ceniza en quemadores de lecho fluidizado.

Compuesto	Carbono	Silicio (como SiO_2)	Calcio (como Ca)	Magnesio (como Mg)	Sodio (como Na)	Potasio (como K)
% en peso	3,0	93	0,2	0,13	0,06	0,05

Fuente: Uso racional de energía en molinos de arroz en Colombia. 1990. Ministerio de Minas y energía.

El principal mineral de la ceniza es el dióxido de silicio, el cual aparece antes y después de la combustión en una forma totalmente diferente, aunque su fórmula química sea la misma (SiO_2).

En la misma cascarilla se encuentra SiO_2 como una forma amorfa hidrogenada, la cual se transforma durante la combustión en cristales de tridimita y cristobalita. Particularmente la ceniza rosada consta casi en su totalidad de cristobalita y tridimita. La temperatura de combustión determina en qué medida se modifica la estructura amorfa. Una transformación del SiO_2 amorfo en cristobalita se puede producir a temperaturas de 800°C , mientras que ésta se convierte en tridimita entre 1100°C y 1400°C . [19]

2.2.4 Cálculo aproximado de capacidad de secado de cascarilla de arroz.

Se conoce que el poder calorífico en relación con el peso en seco es de 13,9 MJ/kg a 16 MJ/kg. Esto quiere decir que si se quema totalmente 1 kg de cascarilla de arroz seco se producirá 13,9 MJ de energía en forma de calor.

Ahora bien, se ha tomado como una referencia de los indicadores de consumo energético para el proceso de secado de arroz, que para secar una tonelada de arroz de 23 % de humedad inicial se necesita 14 kg de combustible fueloil y 20 kWh de electricidad.

1kg fueloil equivale 38 MJ [18]

14 kg fueloil se podría convertir en $14 * 38 = 532$ MJ

1 tonelada de arroz secado necesita 14 kg fuel oíl (y 20 kWh de electricidad) o 532 MJ de energía en forma de calor.

La cantidad de cascarilla de arroz necesaria para secar una tonelada de arroz:

$$M_{CA} = 532/13,9 = 38 \text{ kg CA}$$

2.2.5 Solución para su aplicación

En la Figura 3.1 se muestra la representación esquemática de los procesos del calentamiento del aire para realizar el secado del grano utilizando la cascarilla de arroz como el combustible que oferta la energía que es demandada en las torres de Secado o Secadores. Cuando se realiza la quema de cascarilla de arroz en el quemador con doble turbulizador estático (QDTE), al igual que en otros sistemas de combustión de suspensión, una parte apreciable de las cenizas volante y de partículas incandescentes tienden a ser arrastradas con el flujo de los gases de la combustión por lo que no resulta recomendable enviar dichos gases directamente a las torres de secado, para evitar la posible contaminación e incendio del producto o arroz cáscara.

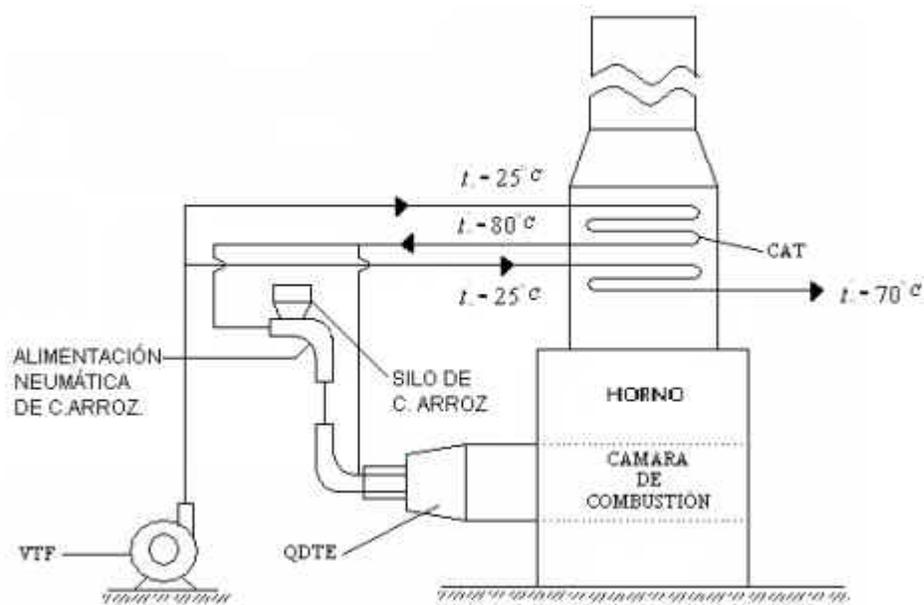


Figura. 2.2.1 Representación esquemática del proceso de calentamiento de aire para el secado del arroz utilizando el QDTE.

En este esquema tecnológico se utilizan dos calentadores de aire tubulares (CAT) que utiliza como agente portador del calor los gases del esquema de la cascarilla. El primer CAT incrementará la temperatura de una determinada masa o flujo de aire, que es alimentado por el ventilador de aire y lo envía directamente a las torres de secados, el segundo CAT calienta otra determinada masa de aire suministrada también por el ventilador de tiro forzado VTF y la envía al QDTE para el proceso de combustión, esto contribuye al mejoramiento de la eficiencia del proceso de combustión y de toda la instalación térmica.

De esta manera el esquema tecnológico garantiza la energía necesaria en el proceso de secado y el de combustión, sin el riesgo de contaminación o incendio antes señalado.

Los gases de la combustión en su recorrido hacia CAT fluyen a través de un separador de cenizas volante, con el propósito de disminuir en lo posible el ensuciamiento de la pared interior de los tubos. Estos CAT deben estar provistos de tapas laterales para la inspección y limpieza de los tubos. El esquema tecnológico pudiera incluir separadores ciclónicos o ciclones intercambiadores de calor cuando se tenga como propósito producir cenizas como subproductos de alto valor agregado, además del calor para el proceso de secado.

Los gases a la salida del CAT se evacuan hacia la atmósfera a través de la chimenea, cuyo tiro efectivo debe superar la caída de presión en los CAT y demás conductos de gases.[1]

Comparación de uso las fuentes de energía analizadas:

	Calor residual de los GE	Cascarilla de arroz (CA)
Disponibilidad	En Cuba, se cuenta con múltiples GE, repartidos por todo el país, cada uno de los cuales emite una enorme cantidad de calor residual disponible para el secado.	La disponibilidad de cascarilla de arroz es escasa debido a que la producción cubana de arroz no es alta.
Capacidad	Los gases de escape de GE salen a 300 a 400o C, esta energía implicaría una enorme capacidad de secado.	El poder calor calorífico de CA es tres veces menor que el de fuel oíl (de 13,9 a 16,2 MJ/kg). Además, su capacidad de secado depende de los equipos que se utilizan para su propia combustión. Por eso se reducen sus ventajas.
Factibilidad	Para su instalación solo se necesita un sistema de regulación de temperatura y el secadero.	Además de los equipos que se necesitan en el caso de los GE, es necesario diseñar un quemador de CA.
Costo de energía	Energía residual	Biomasa

Transportación	Es muy probable que se tenga que transportar el arroz de un lugar para otro, pues los Grupos Electrónicos se encuentran normalmente distantes del campo de arroz	Utilizando la cascarilla de arroz para el secado de arroz se aumentará la eficiencia en la producción de arroz, gracias al aprovechamiento de su subproducto, pero el almacenaje de la cascarilla siempre se tiene que tener en cuenta.
----------------	--	---

Conclusiones:

- El arroz con cáscara que viene del campo generalmente tiene un contenido de humedad entre el 20 y el 27 %. Es necesario disminuir ese grado de humedad tan pronto como sea posible, por lo menos al 14 % para su conservación y procesamiento.
- El secado se puede realizar antes de la trilla o después, en dependencia del volumen de producción de arroz. En el caso del secado después de la trilla, se tienen tres variantes, entre ellas está el secado artificial por vía térmica, que es el más usado en la actualidad.
 - Con el uso del calor que se arrastra por los gases de escape de un motor de marca Hyundai de potencia 1,7 MW se pueden secar aproximadamente 8,3 toneladas de arroz en una hora y si se aprovecha el calor total que sale de la chimenea de una batería de cuatro motores del mismo tipo se secarán 33 toneladas arroz por hora.
- Se necesitan 38 kg de CA para secar una tonelada de arroz, este resultado depende mucho de los equipos utilizados para la combustión de la cascarilla. En comparación con el calor residual de los GE, la cascarilla es menos competitiva pero para los pequeños productores ésta puede ser una buena opción.

Recomendaciones:

- Se necesita comprobar estos resultados en la práctica, lo cual requerirá un grupo electrógeno de tamaño pequeño.
- Se recomienda buscar más alternativas de energía para el secado, y así se puede escoger la más competitiva.

Bibliografías:

1. Ariel, A., *Estudio de la utilización de un quemador de doble turbulizador estático en el proceso de secado agroindustrial del arroz*, Universidad de Cienfuegos.
2. Socorro, M., *Arroz*. 1986: Universidad Central de Las Villas, Facultad de Ciencias Agrícolas.
3. *El Arroz*, D.d.N.y. Dietética., Editora. 2003: Bogotá.
4. S.Paula, *Producción de arroz*. Monografias.com.
5. M.Socorro. *El cultivo popular del arroz en Cuba* 2005; Disponible de: <http://www.desal.org.mx/spip/spip.php?article24>.
6. *Secado*. Disponible de: <http://es.wikipedia.org/wiki/Secado>.
7. *Capítulo 1: Alcances y principios técnicos del secado.*, FAO, Editora.
8. P.Fito, *Introducción al secado de alimentos por aire caliente*.
9. *Métodos tradicionales del secado.*, FAO, Editora.
10. A.Angladette, *el Arroz*, ed. C.Y. TÉCNICAS. 1969.
11. J.Claude, M.F., *Arroz*. 1975: Editorial científico - técnico
12. *Secado de grano*, en *Revista Internacional de las semillas*. 2002, SEED News.
13. *Electricidad en Cuba e indicadores seleccionados*, D.D.I.Y.M. AMBIENTE, Editor. 2010, OFICINA NACIONAL DE ESTADISTICAS.
14. Caballero., M.A.A.Y.P.J.G.J.G.B.A.M., *Operación de un secadero para la producción de arroz*.
15. Moreda, D.A.C.A.D.B.G. *Contribución de la biomasa no cañera a la generación de electricidad en Cuba*; Disponible de: <http://www.fao.org/docrep/t2363s/t2363s0i.htm>.
16. *Consumo de recursos naturales y energía*. . Disponible de: http://www.tecnologiaslimpias.org/html/central/311603/311603_rn.htm.
17. *Temperatura en Cuba*. Disponible de: http://www.gran-caribe.com/espanol/temperatura_cuba.asp.
18. *Térmica* Disponible de: <http://www.google.es/url?sa=t&source=web&cd=3&ved=0CCUQFjAC&url=http%3A%2F%2Fwww.isover.net%2Fasesoria%2Fmanuales%2Fedificacion%2FTermica.pdf&rct=j&q=calor%20especifico%20fue%20oil&ei=kGyaTe3XA8uFhQflrODdBg&usg=AFQjCNFYbU3i8XjVjMBCqMkv4DBVNpd1JA&cad=rja>.
19. *Características Técnicas de la cascarilla de arroz*. Disponible de: <http://www.cascarilladearroz.com/index.php/caracteristicastecnicas.html>.
20. Martínez, R.M., *Perspectivas del aprovechamiento masivo del calor de desecho de las baterías de grupos electrógenos*. 2008.
21. Moya, I.H., *Combustibles para motores de combustión interna*, en *Departamento de Energía*. 2001, Universidad Central de Las Villas.

Anexos:

Motor	$q_e = \eta_e$	q_{ref}	q_g	$q_{c.1}$	q_r
De encendido por chispa	21 – 28	12 – 27	30 – 55	0 – 45	3 - 10
Diesel sin sobrealimentación	29 – 42	15 – 35	25 – 45	0 – 5	2 - 5
Diesel sobrealimentado	35 – 45	10 – 25	25 – 40	0 – 5	2 - 5

Tabla A. Balance térmico [20]

Motores	Tipo de combustible	Parámetros a máxima carga			Parámetros en condiciones normales de trabajo		
		Potencia Ne (kW)	velocidad de rotación n (rpm)	específico de combustible Ge (g/kW-h)	% de carga	Potencia Ne (kW)	específico de combustible, ge
Hyundai	Fueloil	1700	900	210	85	1445	210

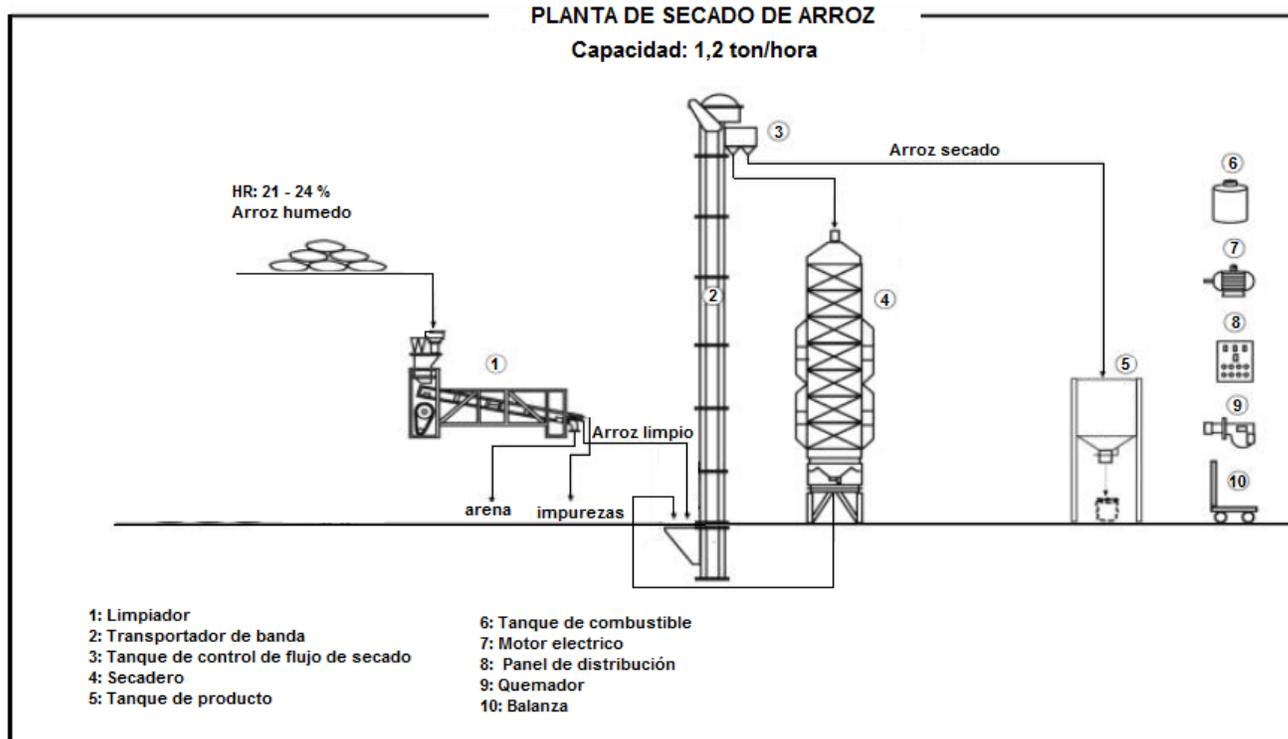
Tabla B. Principales parámetros de los GE utilizados en la GD [20]

Motores	Trabajo efectivo		Gases de escape		Agua de enfriamiento		Calor restante	
	q_e (%)	Q_e (kW)	q_g (%)	Q_g (kW)	q_{ref} (%)	Q_{ref} (kW)	q_r (%)	Q_r (kW)
Hyundai	43	1497	38	1320	16	556	3	100

Tabla C. Parámetros del balance térmicos de los motores utilizados en la GD [20]

Valor medio por Motor	U/M			ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	
	°C	°C	%						%
	T_{amb}	T_{Gas}	O_2	CO	NO	NO _x	SO ₂	CO ₂	α
9	35	352	12	88	3	22	1095	7	2
10	35	354	14	83	11	27	1221	5	3
11	32	324	12	81	2	21	920	6	2
12	28	339	12	138	19	22	1020	7	2

Tabla D. Composición y temperatura de los gases de escape.[21]



Esquema del secadero de arroz de la UCLV.

1. Características de secadero:

Capacidad: 48 quintal = 2,4 toneladas

Consumo del combustible: 20 litros/hora

Tiempo de secado: 2 horas

Indicador de consumo del combustible 16,6 litros/ tonelada

2. Descripción del funcionamiento de secadero:

Antes del secado el arroz húmedo se pasa por el limpiador, después se lleva al secadero por un transportador de tablilla. El arroz se seca por un flujo de aire caliente producido por la combustión de diesel. El arroz cae hacia abajo y vuelve a subir mediante el transportador de tablilla. Este proceso se repite tantas veces como necesario hasta que el arroz logre humedad requerida (14%).