

# “Mejoramiento De Una Secadora Por Tandas De Una Piladora De Arroz”

Franklin Javier Chippe Villacrés<sup>1</sup>, Ignacio Vicente Wiesner Falconí<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción - Escuela Superior Politécnica del Litoral  
[fchippe@gve.satnet](mailto:fchippe@gve.satnet)

<sup>2</sup> Ingeniero Mecánico, Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción - Escuela Superior Politécnica del Litoral, 1971; Postgrado en México, UNAM – Politécnico de México; Investigador Visitante del CENIM – España y el IPT – Brasil; Profesor de la FIMCP – ESPOL desde 1975, Campus Politécnico Prosperina Km. 30.5 Vía Perimetral, Guayaquil, Ecuador, [intramet@hotmail.com](mailto:intramet@hotmail.com)

## Resumen

*El presente trabajo trató en mejorar el sistema de secado de una piladora de arroz por medio de optimizar las secadoras de tandas con equipos de mayor eficiencia, bajos costos de operación y consumo de energía.*

*El trabajo empieza con la descripción de la piladora y el proceso de secado del arroz. Se evalúan los equipos que posee la planta por medio de métodos directos e indirectos de medición para determinar la eficiencia de los equipos y su consumo energético. Con las mediciones realizadas se determinaron los índices de trabajo de la secadora de tandas y después se realizó un análisis de costos de producción y sus deficiencias técnicas con respecto a índices internacionales*

*Para determinar las acciones de mejoramiento se analizaron los sistemas de secado aplicables a las condiciones locales considerando que el grano a secar es arroz en cáscara, el cual es susceptible al maltrato mecánico, temperatura y velocidad de secado, pues fácilmente puede romperse, restando valor comercial al producto terminado. Al seleccionar el sistema y la secadora viable se considerarán como parámetros de selección: la fácil mecanización y la operación. Se selecciona una secadora de tandas con piso inclinado y de varios compartimientos para incrementar la cantidad de granos secos por día, considerando que el secado será lento y a baja temperatura. para garantizar bajos porcentajes de granos partidos.*

*Los cambios realizados han logrado resultados espectaculares y que se resumen en los siguientes: Se dedujo en 47% el consumo eléctrico como consecuencia de reducir la cantidad de ventiladores usados y se elevo la eficiencia del ventilador de 55% a 61%, además se redujo a 77% el costo de operación por tonelada y se aumento en 2% la cantidad de granos enteros en la pilada.*

## Abstract

*Get better rates of rice by a piladora changes in the system of drying rice, using a hair-inclined rounds fact, amending the fan and change the fuel subsidy.*

*Was deducted 47% in electricity consumption as a result of reducing the number of fans used and raising the efficiency of the fan from 55% to 61%, also was reduced to 77% on operating cost per ton and 2% increase in the amount of whole grains in the pilada .*

## INTRODUCCIÓN

En la era de globalización que vive el mundo, donde la competitividad se ha transformado en un elemento clave para

poder sobrevivir de manera duradera y estable en cualquier mercado de producción o de prestación de servicios, es indispensable mejorar la capacidad de

competir. Por lo tanto es necesario desarrollar y aplicar mejores procesos de producción y de bajos costos de operación.

Ecuador es un país consumidor de energía proveniente de fuentes no renovables como el petróleo y sus derivados. Sin embargo el consumo masivo de petróleo en el mundo ha ocasionado que los costos de sus derivados aumenten. A pesar que Ecuador es productor de petróleo depende de combustibles que no se producen internamente como es el caso del gas licuado de petróleo. Este combustible es masivamente usado en hogares e industrias y en especial en la agroindustria. Por muchos años los gobiernos locales han subsidiado el costo del gas, pero debido diversos factores este subsidio ha disminuido para la agroindustria, lo cual ha ocasionado que las piladoras aumenten los costos de producción en el secado de arroz.

Esta situación hace que se retome el uso de combustibles renovables como la biomasa. Ecuador, país tradicionalmente agrícola y productor de arroz tiene la posibilidad de utilizar la cascarilla de arroz como combustible y reemplazar el uso del gas. La utilización de la cascarilla como combustible para el secado de arroz es muy rentable, debido a que la cascarilla de arroz se la considera un desecho y de fácil obtención para la piladora.

En este trabajo se considera la cascarilla de arroz como el combustible a usar para una secadora de tandas, la cual se mecanizará para reducir significativamente costos de operación y producción.

## DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

### Descripción y Operación de la Piladora

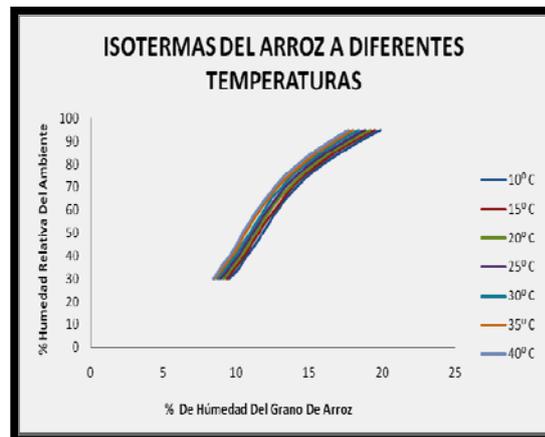
La piladora Imperial es una empresa dedicada a la comercialización de arroz pilado ubicada en la provincia del Guayas en el cantón Alfredo Baquerizo Moreno.

El proceso de la planta empieza con la compra de arroz en cáscara a agricultores de diferentes zonas. Este producto llega a la planta con impurezas y humedad. La

humedad del grano es el factor de mayor importancia que debe ser controlado después de la cosecha, pues a mayor humedad del grano, mayor generación de calor. Pocas horas después de la cosecha la temperatura del grano empieza a aumentar, lo cual favorece al desarrollo de hongos y la proliferación de bacterias que inician procesos de descomposición.

El calentamiento del grano propicia los cambios de color en el arroz de forma tal que la calidad final se demerita. Para mantener las propiedades y la calidad del grano para procesarlo, es necesario bajar la humedad del grano, la temperatura, eliminar insectos, bajar contenidos de impurezas y materiales extraños.

El contenido de humedad de equilibrio del arroz, en determinadas condiciones de temperatura y humedad del ambiente se representan en gráficas isotermas que son simplemente curvas que relacionan el contenido de humedad de equilibrio del arroz con la humedad relativa del aire, a temperatura constante. En la figura se representa una grafica isoterma de arroz en cascara.



## ISOTERMAS DEL ARROZ

La operación de llenado y vaciado de las secadoras se lo efectúa manualmente como se muestran en las figuras. Una vez depositado el grano se procede al secado por medio de forzar aire caliente a través del grano por medio de ventiladores centrífugos de diferentes capacidades.

Para calentar el aire se combustiona GLP directamente a la entrada del ventilador como se muestra en la figura hasta alcanzar una temperatura de 38° a 40° C.



**VACIADO SECADORA**



**TRASLADO DEL GRANO**



**VENTILADOR Y QUEMADOR DE GLP**

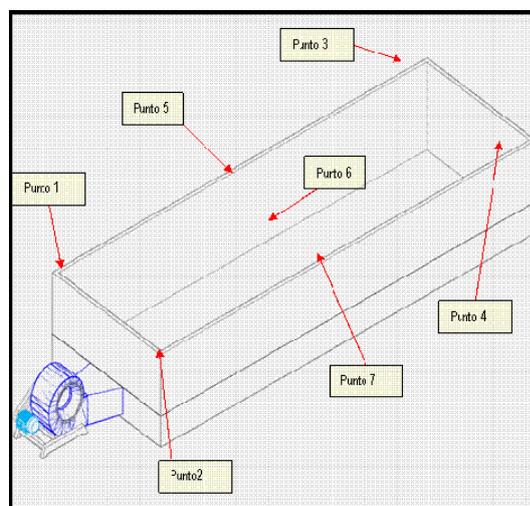
## EVALUACION DE SECADORAS USADAS

La piladora cuenta con nueve secadoras capaces de secar 24 ton cada una. Cada secadora tiene un ventilador de 30 hp acoplado al espacio libre del piso falso por medio de una campana difusora que permite distribuir mejor el flujo de aire por la secadora. Para evaluar las secadoras realizamos mediciones de temperatura, caudal de aire, caída de presión, consumo de energía, tiempo de secado y análisis de granos partidos.

Las mediciones de temperaturas las realizamos con termómetros digitales colocados a la salida del ventilador y a la entrada del piso falso.

Para medir el caudal de aire que el ventilador está produciendo usamos un método indirecto. Con la ayuda de un tubo de pitot y un manómetro digital medimos la caída de presión en el fondo de la cama de granos como se muestra en la figura y con la ayuda de las GRAFICAS DE C.K. SHEDD determinamos el caudal de aire por metro cuadrado que está atravesando el grano. El valor obtenido lo multiplicamos por el área de la secadora y obtenemos los metros cúbicos por minuto que produce el ventilador.

En la figura se muestra los puntos de medición de la secadora y en la tabla I las lecturas.



**PUNTOS DE MEDICIÓN PARA SECADORA DE PARADAS**

**TABLA 1  
MEDICIONES OBTENIDAS EN  
SECADORA**

Dimensiones del secador		Placa del motor		Lecturas con tubo y manguera conectados a manómetro	
Alargado	14.95 m	Hp	30 hp		
Ancho	3 m	RPM	1765 r.p.m		
Alto	0.65 m	Volt	220 V		
Alto piso falso	1 m	Amp	75.4 A	Punto 1	32.51 mmH <sub>2</sub> O
Temperatura al interior del piso falso 40°C		η 100%	91.1	Punto 2	26.16 mmH <sub>2</sub> O
		Cos φ	0.84	Punto 3	51.31 mmH <sub>2</sub> O
Temperatura del grano durante el secado 28.2°C		Lectura con multímetro motor		Punto 4	49.28 mmH <sub>2</sub> O
		Volt	224 V	Punto 5	43.69 mmH <sub>2</sub> O
Temperatura del grano al final del secado 39.1°C		Amp	71.7 A	Punto 6	40.89 mmH <sub>2</sub> O
		Tiempo de secado	30 hr	Punto 7	47.75 mmH <sub>2</sub> O
Humedad relativa 74.6 %		Área descarga ventilador (AV)	0.66 m <sup>2</sup>	Presión estática en el ducto de entrada y salida ventilador 141.48 mmH <sub>2</sub> O	

Mediante las mediciones obtenidas se determina la eficiencia mecánica del sistema de aire o ventilador mediante la expresión:

$$\eta = \frac{ahp}{bhp}$$

Donde:

**ahp** = Potencia aerodinámica (hp)

**bhp** = Potencia mecánica o potencia al freno (hp)

La potencia aerodinámica se define como:

$$ahp = \frac{cfm \times TP}{6356}$$

Donde:

**cfm** = Flujo de aire (pie<sup>3</sup>/min)

**TP** = Presión total (pulgadas de columna de agua, in WC)

$$TP = SP + VP$$

Donde:

**SP** = Presión estática (in WC)

**VP** = Presión dinámica (in WC)

$$VP = \left( \frac{V}{4005} \right)^2$$

Donde:

**V** = Velocidad de descarga del ventilador (pie/min)

(para densidad de aire standard 0.075 lbm/pt<sup>3</sup>)

$$V = \frac{cfm}{AV}$$

Para la obtención del flujo de aire del ventilador usaremos el método indirecto. El promedio de la caída de presión en los siete puntos de medición es:

$$SP = \frac{\sum_{i=1}^n SP_i}{n}$$

$$SP = \frac{1.28 + 1.03 + 2.02 + 1.94 + 1.72 + 1.61 + 1.88}{7}$$

$$SP = 41.15 \text{ mmH}_2\text{O}$$

Con este valor consultamos las gráficas de Shedd tomando en cuenta que la tabla consultada es para una profundidad de granos de 1 m. Por lo tanto la caída de presión por m será 41.15 / 0.65 = 63.31 mmH<sub>2</sub>O / m.

### Evaluación de los costos de producción

La piladora utiliza mano de obra para la carga y descarga de sus secadoras y su producción anual de arroz en cascara sobrepasa las 17.000 ton.

El costo por llenado y descarga por tonelada de las secadoras es de 3.14 \$/ton, dando un costo total por manipuleo de \$ 53.428, 57. Para calcular el costo anual por consumo de combustible asumimos un promedio de humedad de 24% en base húmeda en el arroz a la entrada de la planta.

Este promedio lo tomamos considerando que el arroz en cascara puede llegar a la planta con humedades diferentes dependiendo de la temporada de cosecha. De esta forma la planta utiliza 212.500 kg de GLP. El costo del kg de GLP para consumo agrícola es de 0.33 \$/kg, de esta forma el costo por consumo de combustible es de \$ 70.125,00. A estos costos debemos sumar el costo de energía eléctrica consumida en un año. Para cada secadora obtuvimos un consumo de 701 Kwh por tanda de 24 ton cada una. Para las 17.000 ton de arroz en cascara que se procesan tendremos un consumo anual de 496.541,67 Kwh, el costo del Kwh es de 0.08 \$/Kwh. Entonces el costo por consumo eléctrico es de \$ 39.723,33.

**TABLA 2  
COSTOS OPERACIÓN SECADORA**

<b>Resumen de costos de producción en secadoras de la piladora imperial para un año</b>	
Costo por mano de obra	\$ 53.428, 57
Costo por consumo de combustible	\$ 70.125,00
Costo por consumo eléctrico	\$ 39.723,33
Costo total	\$ 163.276,00

En resumen el costo de secar una tonelada de arroz en cascara es de 9.6 \$/ton.

#### **Selección de sistema de secado viable**

Las secadoras de granos pueden considerarse sistemas de aire especializados, que succionan aire de un espacio abierto y lo descargan, después de cumplir su función de remover y transportar humedad, en otro espacio abierto.

Una secadora de granos está formada por los siguientes elementos principales:

- Entrada de aire
- Ventilador
- Quemador
- Conductos de aire
- Compuertas
- Cámaras
- Recipiente para grano
- Equipos para cargue y descargue de grano;

Estos elementos se pueden identificar en las figuras siguientes que corresponden a secadoras de alberca y a secadoras de torre de flujo continuo.

#### **Secadoras de Tandas Inclinadas o Albercas**

El diseño de las secadoras de alberca evolucionó en Colombia a partir de las secadoras de sacos que introdujo, hacia 1948, la empresa Lister, fabricante Inglés de motores Diesel. Su principio de

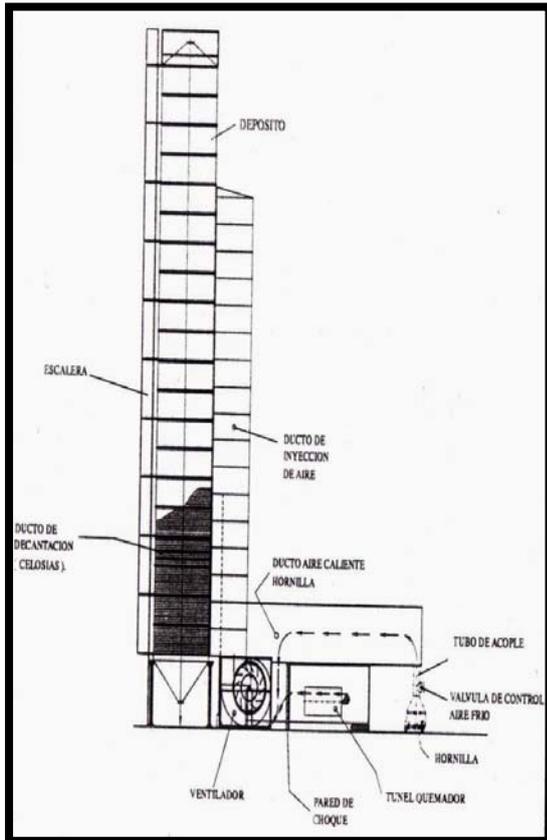
funcionamiento se basa en el principio de secado por tandas en lecho inclinado para facilitar su mecanización al momento de cargar y descargar la secadora. A su vez compartir un solo equipo de aire y generación de calor para optimizar los tiempos de secado mediante obtener un proceso continuo de carga y descarga de la secadora sin tener que parar los equipos de ventilación y generación de calor.

#### **Secadoras de Flujo Continuo**

Las secadoras de flujo continuo, conocidas como de columna o de torre, fueron desarrolladas en los Estados Unidos para atender las necesidades de secado artificial que introdujo la utilización masiva de cosechadoras combinadas, durante la Segunda Guerra mundial y en los años siguientes.

- Recipiente de granos y un tanque de reserva superior. La capacidad de estos recipientes puede oscilar entre 10 y 100 toneladas.
- Quemador de combustible equipado con control de temperatura. Y termostatos limitadores de temperatura. Estos deben ser dos, colocados en los conductos de aire frío (salida de aire a la atmósfera) y de aire caliente. El termostato del lado de aire frío se debe graduar aproximadamente 40 °C y el del lado caliente a aproximadamente 60°C. Si cualquiera de los dos termostatos detecta sobrecalentamiento en el conducto, el circuito eléctrico debe desconectar los motores de los ventiladores y del quemador.
- Ventiladores centrífugos o axiales.
- Mecanismo de descarga de grano velocidad variable
- Sección de enfriamiento, generalmente se utiliza aire ambiente y se ajusta por medio de compuerta desde el exterior.

Estos elementos se ilustran en la figura



## SECADORA DE FLUJO CONTINUO

### Secadora de piso inclinado por tandas

Este tipo de secadoras también denominadas albercas utilizan pisos de malla perforada, para forzar aire a través de capas de grano, de espesor que oscila entre 60 y 150 cm. Las albercas son adecuadas para manejar cantidades pequeñas o medianas de arroz en cascara. Este sistema ha tenido bastante aceptación en países como Colombia, pues tiende a partir menos granos en comparación a otros sistemas mecanizados.

Un trabajo de investigación aplicada, realizada por la Federación Nacional de Arroceros de Colombia, presenta las siguientes conclusiones y sugerencias, para el mejor diseño y operación de secadoras tipo albercas.

- Como norma general se recomienda que el volumen de aire no sea inferior a aproximadamente 14 M<sup>3</sup>/Min por tonelada de grano.
- En el caso de que con un mismo túnel, se abastezca de aire a varios compartimentos, las velocidades del aire en los túneles, especialmente en el tramo entre la descarga del ventilador y la primera puerta, deben mantenerse inferiores a 600 metros por minuto, con el fin de disminuir las diferencias entre la cantidad de aire que recibe el primer compartimento y los siguientes.
- Para controlar la velocidad del aire y al mismo tiempo insuflar alto volumen en el grano, es necesario utilizar conductos de mayor tamaño que los utilizados tradicionalmente.
- El manejo del aire en todo el sistema debe ser delicado, se debe evitar las contracciones o expansiones abruptas, las curvas demasiado fuertes, las puertas innecesarias etc.
- El mantener una temperatura de secado relativamente constante es de mucha importancia en horas de la noche, cuando la temperatura ambiente desciende y la humedad relativa del ambiente aumenta. El descenso de temperatura reduce la capacidad efectiva de secado y fomenta la aparición de fisuras en el arroz que se encuentre relativamente seco, al rehumedecerlo.
- Aéreas reducidas para desfogue del aire que ya ha atravesado el grano, introducen resistencia adicional de importancia al ventilador y, además, dificultan la evacuación del aire húmedo. Las áreas libres entre los aleros de los techos y las paredes de las albercas deben equivaler por lo menos al 30% del área de pisos perforados de los compartimentos. Es conveniente construir sobre techos, que faciliten la salida del aire cargado de humedad a la atmósfera y evitar su condensación en los techos.
- El tiempo de secado depende principalmente de las condiciones ambientales, de la temperatura del aire de secado y del volumen de aire aplicado por una determinada cantidad de grano.

- Las albercas inclinadas se construyen generalmente con pendientes que varían entre 32° y 35°. Mientras las primeras tienen mayor tendencia a necesitar ayuda de mano de obra para su descargue total, las de mayor pendiente (34-35%), tienen tendencia a fluidizar el grano y sufrir algún rodado espontáneo de arroz, cuando reciben demasiado aire por efecto del cierre de las compuertas de varios compartimientos. La pendiente recomendable, que equilibra problemas y ventajas puede ser de 33 o 34°.
- La alimentación de las albercas, preferiblemente debe hacerse desde un transportador de banda con ayuda de una vagoneta de descarga que pueda colocarse en cualquier sitio de la alberca, para conseguir llenarla de manera uniforme.

En caso de que se utilicen transportadores sinfín o de arrastre para llenar las albercas, dentro de lo posible se debe instalar una descarga cada metro.

Debe resaltarse que la inclinación de aproximadamente 33° de los pisos perforados permite que las operaciones de llenado y descarga se hagan de manera mecanizadas, con muy poca necesidad de utilizar mano de obra.

La pérdida de humedad en las capas de arroz difiere de manera importante de acuerdo con la profundidad y con el tiempo de secado. En la figura 1.12 se ilustra el avance del proceso.

## SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

### Equipos necesarios para el secado en piso inclinado

Para determinar los equipos necesarios debemos considerar la cantidad de granos que la secadora debe procesar por día. La piladora procesa 17000 toneladas de arroz en cascara por año. Sin embargo el flujo de arroz que puede recibir en un día de cosecha es de 60 ton por día. Con ese flujo debemos dimensionar la secadora considerando que debemos de limpiar el

arroz húmedo antes de secar. Esta labor de prelimpieza tiene por objeto principal remover las impurezas grandes, algo de grano partido, de polvo e impurezas livianas. Generalmente la pre limpieza se efectúa en línea con el recibo de grano, por esa razón su capacidad debe ser suficiente para que no afecte la velocidad de recibo. Si consideramos que la piladora recibe 60 ton en un día, calculamos la capacidad de la pre limpia de tal forma que pueda limpiar esa masa en un tiempo no mayor a tres horas, pues el arroz llega generalmente a la piladora en las últimas horas de la tarde y solo se dispone de cuatro a seis horas del día para recibir el arroz en cáscara, limpiarlo y depositarlo en la secadora.

### Cálculo del ventilador requerido

Unos de los componentes fundamentales para la secadora es el ventilador, pues es el que forzará el aire caliente a través del grano para remover la humedad del mismo. Para su selección hay que conocer cuanta masa de aire de mover y a qué presión debe operar para vencer la resistencia al aire del sistema de secado. Adicionalmente este equipo debe soportar trabajar con temperaturas de 27° a 45°C. Para determinar el caudal de aire a mover, se tiene que conocer los parámetros necesarios para la secadora.

Para determinar la cantidad de aire requerido nos valemos de la ecuación de equilibrio de calor para procesos de secado de granos:

$$\frac{cfm \times 60}{v} (c_a)(T_a - T_g)t = h_{fg}DM(M_o - M_g)$$

Donde:

$cfm$  = Flujo de aire de secado (pie<sup>3</sup>/min)

$v$  = Volumen de aire específico (ft<sup>3</sup>/lb)

$T_a$  = Temperatura aire caliente (°F)

$T_g$  = Temperatura del aire a la salida del grano (°F)

$t$  = Tiempo en horas

$h_{fg}$  = Calor latente de vaporización (Btu/lb)

$DM(M_o - M_g)$  = Cantidad de agua a evaporar en la masa de granos (lb)

Por psicrometría se obtiene el valor del volumen específico del aire calentado de

27°C con 74,6 % de humedad; a 38°C y 40% en un proceso de relación de humedad y de temperatura o punto de rocío constante. De la carta psicométrica el valor  $v=14.5 \text{ ft}^3/\text{lb}$ .

Para obtener el calor latente de vaporización de la humedad del grano se considera que el calor requerido para evaporar una libra de agua del grano es función del contenido de humedad del grano y la temperatura en la cual ocurre la evaporación. Para propósitos de cálculo se considera el calor latente de vaporización  $h_{fg} = 1200 \text{ Btu/lb}$ .

La temperatura  $T_a$  representa la temperatura del plenum o temperatura del aire caliente  $T_a = 38^\circ\text{C}$  (100.4°F).

La temperatura  $T_g$  representa la temperatura del aire a la salida del grano, la cual será la temperatura de saturación del aire o temperatura de bulbo húmedo pues se considera un proceso adiabático  $T_g = 79.2^\circ\text{F}$ .

Finalmente la cantidad de humedad a remover expresada en la relación  $DM(M_o - M_e)$ , es la cantidad de agua a evaporar en la masa de granos. Para nuestro caso se secará 192 ton de granos de 24% a 10% de humedad en base húmeda. Es decir se removerá  $DM(M_o - M_e) = 65,706.67 \text{ lb}$  de agua.

Entonces:

$$\frac{\text{cfm} \times 60}{14.5} (0.24)(100.4 - 79.2)72 = 1200 \times 65,706.67$$

$$\text{cfm} = 52,014.91$$

A este valor hay que agregar un 15%, pues se considera que existe la posibilidad de que el grano sobrepase la humedad promedio y que pueden existir pérdidas de aire en el sistema por compuertas mal cerradas. Entonces el ventilador deberá producir un flujo de  $1,695.13 \text{ m}^3/\text{min}$  ( $59,817.14 \text{ ft}^3/\text{min}$ ).

Para determinar la caída de presión que debe vencer el ventilador en el sistema se considera que 192 ton estarán distribuidas en las secciones de las albercas. Toda la secadora estará compuesta de ocho secciones de  $32.4 \text{ m}^2$  cada una, lo cual

significa un área de  $259.2 \text{ m}^2$  para  $1,695.13 \text{ m}^3/\text{min}$ .

Con estos datos se verifica en la gráfica de Shedd la resistencia del grano con la relación  $6.56 \text{ m}^3/\text{min}/\text{m}$  y se obtiene un valor de  $33.32 \text{ mm H}_2\text{O}$  por cada m de profundidad. Si se tiene 192 ton en un área de  $259.2 \text{ m}^2$  y un peso específico del grano de  $0.580 \text{ ton}/\text{m}^3$  entonces la profundidad del grano será 1.28 m. Entonces multiplicando  $33.32 \text{ mm H}_2\text{O}/\text{m} \times 1.28 \text{ m}$  y se obtiene una resistencia de  $42.65 \text{ mm H}_2\text{O}$  (1.68 in WC).

La resistencia del sistema generador de calor puede alcanzar 2.3 in WC según mediciones experimentales realizadas en quemadores de cascara de arroz de diferentes fabricantes.

Finalmente la resistencia del ducto de aire es despreciable, pues su dimensión es de  $2 \times 2 \times 18 \text{ m}$ , lo que hace que la resistencia al movimiento de aire se despreciable en comparación a los dos valores mencionados antes.

Con los valores calculados de caudal de aire y presión estática requeridos consultamos tablas de fabricantes de ventiladores. El ventilador debe producir un volumen de aire medio, presión estática media y una alta eficiencia. Su construcción debe ser económica y su acople al sistema de secado sencillo. De esta forma se selecciona un ventilador centrífugo aerodinámico de doble entrada y doble ancho.

Según tablas de fabricantes (Apéndice A1) se elige un ventilador de 60 in de diámetro de rotor, que rotará a 554 r.p.m para producir un volumen de aire de 60,000.00 cfm a 4 in WC de presión estática y un consumo de 46.3 bhp.

### Cálculo del generador de calor

Para determinar el generador apropiado para la secadora se debe considerar que el combustible a usar será la cascara de arroz. La utilización de cáscara como combustible permitirá un ahorro significativo, pues la cáscara se considera un desecho. Además posee un poder

calorífico semejante a la madera de 13.500 btu/kg (3.401,73 kcal/kg).

Para determinar la dimensión del horno quemador de cascara de arroz se calcula el calor que debe entregar al aire de secado. Para esto se utiliza la expresión:

$$Q = \dot{m}_{\text{aire}} c_p (T_a - T_{\text{amb}})$$

Donde:

$\dot{m}_{\text{aire}}$  = Flujo másico (lb/hr)

$$\dot{m}_{\text{aire}} = \frac{60,000 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}}}{13,9 \frac{\text{ft}^3}{\text{lb}}} \cdot 60 \frac{\text{min}}{\text{hr}} = 258,992,81 \frac{\text{lb}}{\text{hr}}$$

Entonces:

$$Q = 258,992,81 \frac{\text{lb}}{\text{hr}} \cdot 0,24 \frac{\text{Btu}}{\text{lb} \cdot \text{R}} (19,8 \text{R})$$

$$Q = 1'230,733,83 \frac{\text{Btu}}{\text{hr}}$$

Con este valor se consulta los equipos disponibles en el mercado (Apendice A2 y A3) y se selecciona un generador de calor que produzca 1'200,000 a 1'800.000 btu/hr con un consumo aproximado de 120 kg/hr de cascara de arroz.

### Construcción, montaje y funcionamiento del secador

Como se mencionó en capítulos anteriores, el proceso empieza con la recepción del grano. Para esto se dimensiona y construye una tolva de recepción, donde se depositarán los granos que llegan del campo. La dimensión de la tolva es de 6 X 3 m y la profundidad de 3 m para tener 45° de inclinación en sus tres caras.

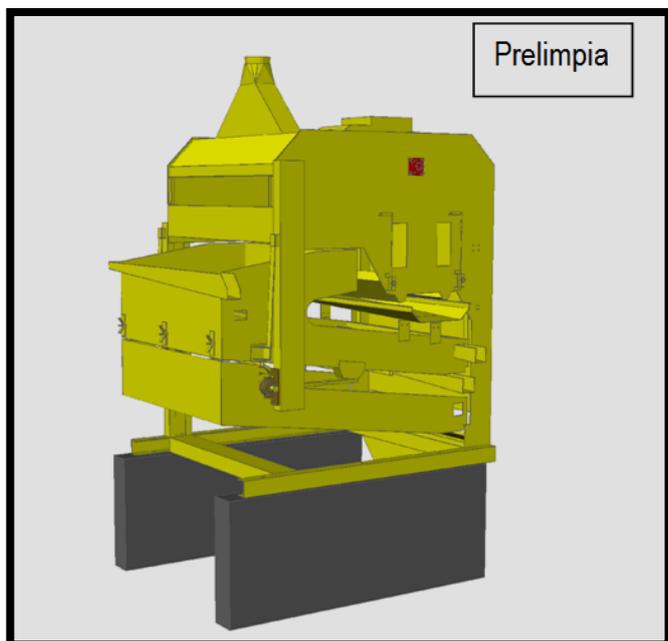
Es importante conservar esta inclinación para asegurar que todo el grano, incluyendo las impurezas, pueda alimentar fácilmente el elevador que descarga la tolva y a su vez carga la prelimpia. Este elevador de 3 hp y 30 ton/hr, dirige el flujo hacia una prelimpia de granos,

equipo compuesto de zarandas oscilantes y cámaras de succión.

Este equipo reducirá las impurezas desde un promedio de 4% a 1.5%, por medio de cribar el grano en planchas perforadas de huecos alargados de 4 X 20 mm para retirar la impurezas mayores y de 1.5 X 15 mm para retirar la impurezas menores. En cambio las impurezas livianas y el polvo son retiradas por una corriente de aire que atraviesa el grano a la entrada y a la salida de la máquina.

Para mantener limpias las perforaciones de las cribas, se utilizan bolas de caucho que rebotan entre la criba y una malla inferior abierta. Para accionar las zarandas la máquina usa un motor de 2 hp y para el succionador un motor de 5 hp.

La capacidad de limpieza es de 20 ton/hr con granos de 4% de impurezas, su capacidad de limpieza puede disminuir si el grano entra con mayor impureza.

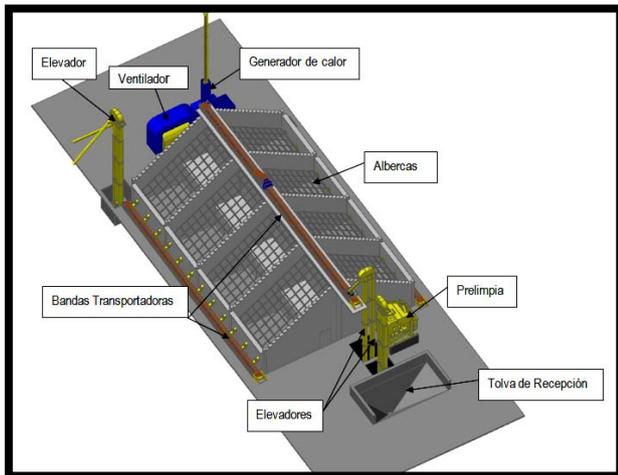


### EQUIPO DE PRELIMPIEZA

Una vez que el grano pasa la prelimpia, es receptado por otro elevador que dirige el grano hacia una banda transportadora con vagoneta de descarga. Esta banda con su vagoneta permitirá descargar el grano en diferentes puntos de la secadora. Para asegurar la carga en la banda se selecciona una banda transportadora de rodillos portantes inclinados a 20°. La capacidad

de la banda es de 40 ton/hr, su longitud de 22 m y es accionada por un motor reductor de 2 hp.

El grano se deposita en la secadora, que es una estructura construida de hormigón y bloques.



### COMPONENTES DE SECADORA DE TANDAS INCLINADAS

### EVALUACIÓN ENERGÉTICA Y ECONÓMICA DE LA SECADORA

#### Evaluación de la Eficiencia de la secadora

Para la evaluación de la secadora se recurre al método descrito en el capítulo 1, se mide temperatura, caudal de aire, caída de presión, consumo de energía, tiempo de secado y análisis de granos partidos. Las mediciones se realizaron con manómetro y tubo de pitot para obtener la caída de presión en una capa de granos, para luego con la ayuda de la gráfica de SHEDD obtener la cantidad de aire que está atravesando el grano. Con la ayuda de un amperímetro de se determina la corriente de consumo de los equipos para determinar la potencia usada. El análisis de granos partidos se lo efectúa en el laboratorio de la planta con cilindros de calibración o de alveolos. En la tabla se detalla las mediciones

**TABLA 3**  
**TABLA DE MEDICIONES**

Dimensiones del secador		Placa del motor		Lecturas con tubo y manguera conectados a manómetro	
Largo	18 m	Hp	50 hp		
Ancho	14.4 m	RPM	1770 r.p.m		
Alto	1.20 m	Volt	220 V	Punto 1	30.73 mmH <sub>2</sub> O
		Amp	122 A	Punto 2	32.51 mmH <sub>2</sub> O
Temperatura al interior del ducto 39.2°C		η 100%	92.5	Punto 3	33.02 mmH <sub>2</sub> O
		Cos φ	0.86	Punto 4	30.48 mmH <sub>2</sub> O
Temperatura del grano durante el secado 28.2°C		Lectura con multímetro motor		Punto 5	30.73 mmH <sub>2</sub> O
		Volt	230 V	Punto 6	31.50 mmH <sub>2</sub> O
Temperatura del grano al final del secado 38.2°C		Amp	98 A	Punto 7	31.24 mmH <sub>2</sub> O
		Tiempo de secado	72 h	Punto 8	30.73 mmH <sub>2</sub> O
Humedad relativa 73.2 %		Área descarga ventilador (AV)	3.46 m <sup>2</sup> (37.24 ft <sup>2</sup> )	Presión estática en el ducto de entrada y salida ventilador 79.25 mmH <sub>2</sub> O	

Para la obtención del flujo de aire del ventilador usaremos el método indirecto.

El promedio de la caída de presión en los ocho compartimientos es:

$$SP = \frac{\sum_{i=1}^n SP_i}{n}$$

$$SP = \frac{30.73 + 32.51 + 33.02 + 30.48 + 30.73 + 31.50 + 31.24 + 30.73}{8} = 31.37$$

Con este valor consultamos las tablas de Shedd tomando en cuenta que la tabla consultada es para una profundidad de granos de 1 m. Por lo tanto la caída de presión por m será  $31.37 / 1.2 = 26.14$  mmH<sub>2</sub>O / m. Según la tabla tenemos un valor aproximado de  $5.49$  m<sup>3</sup>/min/m<sup>2</sup>.

El área del secador es  $259.2$  m<sup>2</sup>, multiplicado por  $5.49$  m<sup>3</sup>/min/m<sup>2</sup> tenemos un flujo de aire de  $1,422.38$  m<sup>3</sup>/min ( $50.192,27$  cfm).

Entonces:

$$V = \frac{50.192,27}{37.24} = 1.347,81 \text{ ft}/\text{min}$$

$$VP = \left( \frac{1.347,81}{4005} \right)^2 = 0.11 \text{ in WC}$$

$$TP = 3.12 + 0.11 = 3.23 \text{ in WC}$$

$$ahp = \frac{50.192,27 \times 3.23}{6356} = 25.51 \text{ hp}$$

Para obtener la potencia al freno del motor usamos la siguiente expresión:

$$bhp = \frac{\sqrt{3} \times V \times I \times \cos \phi \times \eta}{746}$$

$$bhp = \frac{\sqrt{3} \times 230 \times 98 \times 0.86 \times 0.925}{746} = 41.63 \text{ hp}$$

Con esto resultados tenemos que la eficiencia mecánica del sistema de aire o ventilador es:

$$\eta = \frac{25.51}{41.63} \times 100 = 61\%$$

El consumo específico de energía del generador de calor lo determinamos por medio del consumo de cascarilla de arroz combustionada.

Consumo de cascarilla:

$$\dot{m}_f = 117 \text{ kg/hr}$$

Entonces el consumo energético:

$$\dot{Q} = \dot{m}_f \times PCS_{cascarilla}$$

$$\dot{Q} = 117 \times 3.40173 = 398.002,41 \frac{\text{kcal}}{\text{hr}}$$

Para calcular el poder de evaporación de la secadora tenemos que determinar la cantidad de agua evaporada por el tiempo que duró el secado 72 horas. El agua evaporada del grano se calcula de la siguiente forma:

$$W_f = 192 \left( \frac{100 - 24}{100 - 10} \right) = 162.13 \text{ ton}$$

$$W_{H_2O} = 192 - 162.13 = 29.87 \text{ ton}$$

Entonces el poder de evaporación de la secadora es de  $414.81 \frac{\text{kg}_{H_2O}}{\text{hr}}$

Dividiendo el consumo energético por el poder de evaporación:

$$\frac{398.002,41 \frac{\text{kcal}}{\text{hr}}}{414.81 \frac{\text{kg}_{H_2O}}{\text{hr}}} = 959.47 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}_{H_2O}}$$

Si consideramos que el calor necesario para evaporar 1 kg de agua es de 600 kcal la eficiencia de la secadora es:

$$\eta = \frac{600}{959.47} \times 100 = 62.3 \%$$

Finalmente evaluamos el generador de calor por medio de la expresión:

$$\eta_{gen} = \frac{\dot{Q}_{salida}}{\dot{Q}_{entrada}} \times 100$$

Donde:

$$\dot{Q}_{entrada} = \dot{m}_f \times PCS_{cascarilla} = 398.002,41 \frac{\text{kcal}}{\text{hr}} \left( 1'579.500 \frac{\text{Btu}}{\text{hr}} \right)$$

$$\dot{Q}_{salida} = \dot{m}_{aire} c_p (T_a - T_{amb})$$

Donde:

$$\dot{m}_{aire} = \frac{50,192,27 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}}}{13.9 \frac{\text{ft}^3}{\text{lb}}} \times 60 \frac{\text{min}}{\text{hr}} = 216,657.28 \frac{\text{lb}}{\text{hr}}$$

Entonces:

$$\dot{Q}_{salida} = 216,657.28 \frac{\text{lb}}{\text{hr}} \times 0.24 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}^\circ\text{R}} (21.96^\circ\text{R})$$

$$\dot{Q}_{salida} = 1'141.870,53 \frac{\text{Btu}}{\text{hr}}$$

Entonces:

$$\eta_{gen} = \frac{1'141.870,53}{1'579.500,00} \times 100 = 72\%$$

### Evaluación económica del proceso

Para evaluar este proceso de secado debemos determinar los costos de operación de la secadora para un año de operación, la cual secará 17.000 ton.

Esta masa de granos pasará por los respectivos equipos de elevación, transporte, limpieza y secado. El costo de operación de estos equipos se lo determina por el consumo eléctrico, el consumo de combustible, costo de operadores y mantenimiento.

El costo de consumo eléctrico lo determinamos por los kilovatios horas consumidos al procesar 17.000 ton en un año.

**TABLA 4  
KILOVATIOHORA  
NECESARIOS PARA  
PROCESAR 17.000 TON**

Equipo	Horas	Kw	Kwhr
Elevador #1 20 ton/hr	850	2.2	1870
Prelimpia 20 ton/hr	850	5.2	4420
Elevador #2 20 ton/hr	850	2.2	1870
Banda con vagoneta 20 ton/hr	850	1.5	1275
Banda descarga lateral #1 30 ton/hr	283	1.5	425
Banda descarga lateral #2 30 ton/hr	283	1.5	425
Banda transversal #3 30 ton/hr	283	1	283
Quemador	6375	2.61	16.639
Ventilador	6375	37	235.875
Total kilovatiohora consumidos en año			263.082

Conociendo el valor total de kilovatios/hora a consumir determinamos el costo en energía eléctrica a razón de 0.08 \$/Kwhr tenemos un costo de \$ 21.046,56 para un año de operación.

El costo de mano obra lo calculamos por dos operadores para dos turnos, pues la secada es un proceso de 24 horas.

El costo por los dos operadores es de \$ 6.000,00 para un año de operación y el costo de tres estibadores para bajar la carga de los camiones es de \$ 9.000,00.

El costo de mantenimiento por lubricación de chumaceras, cadenas, limpieza y reparaciones menores por desgaste de tuberías es de \$ 1.200,00.

Finalmente el costo por combustible usado es \$ 0, pues las cascarilla es un desecho de las piladoras y solo se usará la cuarta parte de lo que produce la piladora.

**TABLA 5  
RESUMEN DE COSTOS DE  
OPERACIÓN DE LA SECADORA**

Costo por mano de obra	\$ 15.000,00
Costo por consumo de combustible	\$ 0
Costo por consumo eléctrico	\$ 21.046,56
Costo por mantenimiento	\$ 1.200,00
Costo total	\$ 37.246,56

En resumen el costo de secar una tonelada de arroz en cáscara en la secadora de tandas inclinadas es de 2.19 \$/ton.

### **Cálculo de la recuperación de la inversión**

Para analizar si el proyecto será rentable para la empresa se realizó un flujo de caja a partir de los datos que se proporcionó.

El valor de las ventas se lo calculó tomando en cuenta un crecimiento del 1% mensual y con un precio promedio de \$28 el quintal de arroz.

La inversión total de la empresa será de \$150.000 de los cuales el 60% será financiado con un préstamo con una tasa de interés del 8%.

Calculado el flujo de caja se obtuvo que, para un periodo de siete meses, las cifras son positivas; esto quiere decir que en cada periodo los ingresos de efectivo son mayores a los egresos o salidas de efectivo.

La tasa de descuento se definió en base al porcentaje de interés que actualmente están pagando los bancos por ahorrar dinero en los mismos, que se encuentra en alrededor del 12% anual, lo que en meses representa el 1%.

Nos basamos en este valor porque de esta forma podremos analizar si es más rentable para la empresa invertir en el proyecto, o mantener el dinero en los bancos.

Para calcular en cuanto tiempo se recuperara la inversión realizada se utilizara el método del valor presente.

Como el dinero tiene un valor en el tiempo, mediante este método se procederá a conocer cuál será el valor de cada uno de los Flujos Netos Efectivos en el periodo cero, periodo en el que se realiza la inversión.

Este método consiste en llevar los valores de los flujos de efectivo pronosticados a dólares de hoy y, para lograr este objetivo,

es necesario descontar cada uno de los flujos a su tasa de descuento (1%).

$$\frac{31,399.46(1.01)^1}{(1.01)^1} + \frac{31,398.48(1.01)^2}{(1.01)^2} + \frac{31,630.34(1.01)^3}{(1.01)^3} + \frac{31,853.37(1.01)^4}{(1.01)^4} - \frac{32,097.55(1.12)^5}{(1.12)^5} = 153728.268$$

Con el cálculo realizado se obtuvo que la empresa recuperara su inversión en un periodo de cinco meses

Además el VAN calculado para los siete meses es positivo. Esto nos deja ver que el proyecto generará, según los pronósticos realizados, un incremento en la riqueza de la empresa de \$ 63,572.54, lo que prueba que se trata de un proyecto sumamente rentable para la misma.

La TIR o Tasa Interna de Retorno nos produce un valor del 23%. El que este valor sea mayor en un 22% al porcentaje de interés que pagan los bancos por ahorrar el dinero, deja ver que realizar el proyecto será en un 22% más rentable para los inversionistas que tener el dinero ahorrado en el banco.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

Después de haber realizado las mejoras en los equipos de secado en la piladora Imperial se tienen las siguientes conclusiones:

- Las mejoras en la secadora redujeron considerablemente el costo de producción de 9.6 \$/ton a 2.19 \$/ton.
- La eficiencia de ventilador aumento de 55% a 61%.
- El ahorro de energía fue considerable al reducir el consumo eléctrico en 47%.
- Se aumento el porcentaje de granos enteros en la pilada de 90% a 92%.

### Recomendaciones

- Analizar la posibilidad de incorporar una secadora de flujo continuo del producto al inicio del proceso para acelerar el tiempo de secado y

combinarla con una secadora de tandas inclinadas para terminar el proceso sin deteriorar el grano

- Evitar fuga de aire en compuertas de ventilación y descarga de granos.
- Mejorar el sistema de control de temperatura del generador de calor para que no baje la temperatura del aire de secado durante las noches.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ALVARO CASTILLO NIÑO, Almacenamiento de Granos, Aspectos Técnicos y Económicos, Ediagro, 1984
2. ALVARO CASTILLO NIÑO, Molinería de arroz en los trópicos, Editor Ediagro 1999
3. CEMA, Belt Conveyors for Bulk Materials, CEMA, 1997
4. CHAO JULIO, Pautas para el Diseño y Construcción de fogones eficientes para la combustión de cascarilla de arroz, 1987
5. CLAUS MARTIN BRAUNBECK, Development of a Rice Husk Furnace for Preheating of the Drying Air of a Low - Temperature Drying System, Hohenheim, 1998
6. DONALD B. BROOKER, Fred W. Bakker-Armena, Carl W. Hall Drying Cereal Grains, The Avi Publishing Company Inc., 1974
7. ESPINOZA MARCELO, Apuntes de clase "Secado y almacenamiento de granos" Termino I 1997
8. FRANK P. BLEIER. FAN HANDBOOK Selection, Application, and Design, McGraw-Hill, 1997
9. HUMBERTO GUTIERREZ PULIDO, Román de la Vara Salazar, Control Estadístico de la

Calidad y Seis Sigma, Editorial McGraw-Hill, 2004

10. J. ROLDAN VILORIA, Manual del Electricista de Taller, Editorial Paraninfo, 2001
11. LOUIS A.ROBB, Diccionario para Ingenieros, Editor C.E.C.S.A., 1979
12. RAIMON A. Serway, Física, Editorial McGraw-Hill, 1992
13. ROBERT W. FOX, ALLAN T. McDonald, Introducción a la mecánica de fluidos, Editor McGraw-Hill, 1995
14. RULLI RULMECA, Bulk Handling, RULLI RULMECA, 1998
15. VIRGIL MORING FAIRES, Clifford Max Simmang, Termodinámica, Noriega Editores 1990
16. WOLFGANG MÜLLER, Electrotécnica de Potencia, Editorial Reverté S.A., 1985