

## MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE SECADO DE CEREALES EN UNA EMPRESA PRODUCTORA DE ALIMENTO PARA AVES DE CORRAL

### RESUMEN

A partir de este estudio se creó una propuesta para mejorar el proceso de secado de cereales, teniendo en cuenta que una mala gestión en este proceso, genera retrasos en producción, detrimento de la calidad del producto y por ende riesgos químicos, biológicos y físicos, poniendo en peligro la vida de las aves que se alimentan del producto terminado. Para tal efecto, se realizó un estudio analítico del proceso, encontrándose dos puntos críticos en particular: Una falta de homogeneidad en la humedad de los granos secos y prolongados tiempos de secado. Este estudio ocupó el segundo lugar en la convocatoria de ACAIRE.

**PALABRAS CLAVES:** Secado, proceso, cereales, humedad y homogeneidad.

### ABSTRACT

Starting from this study a proposal was generated to improve the process of drying of cereals, keeping in mind that a bad administration in this process generates delays in production, detriment of the product's quality, chemical, biological and physical risks. Putting in danger the birds's life that feed of the finished product. For such an effect it was carried out an analytical study of the process. In this two critical points were found in particular: a lack of homogeneity in dry grains humidity and extensive periods of drying.

**KEY WORDS:** Drying, process, cereals, humidity, homogeneity.

### 1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este trabajo es crear una propuesta para mejorar el proceso de secado de cereales, teniendo en cuenta que una mala gestión en este proceso, genera retrasos en producción, detrimento de la calidad del producto y por ende riesgos químicos, biológicos y físicos, poniendo en peligro la vida de las aves que se alimentan del producto terminado. Para tal efecto se realizó un estudio analítico del proceso, con el fin de encontrar los puntos críticos del mismo para hacer principal énfasis en los que presentan más alta criticidad, y adicional a ello se investigó todos los procesos existentes en el país y en el mundo, sin omitir las diferentes condiciones a las que cada uno de los sistemas están expuestos.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial w} = 0$$

Principalmente se tuvo en cuenta 2 puntos en particular: el primero, mejorar la homogeneidad de secado, para ello se realizaron 5 configuraciones geométricas, las cuales fueron analizadas por medio de la toma de datos para su posterior análisis estadístico. El segundo punto se

concentra en la disminución del tiempo de secado de los granos teniendo como principio el aumento del caudal de aire por metro cúbico de grano.

Una vez finalizada esta fase de investigación, se procedió con:

1. Descripción del proceso de secado de G.B.A.
2. Aplicación del modelo matemático de Thompson al proceso actual de secado.
3. Diseño y construcción del prototipo.
4. Análisis estadístico del proceso de secado.
5. Selección de la alternativa con base en los resultados de las muestras proporcionadas por el prototipo.
6. Reubicación de los ventiladores de las secadoras.
7. Recomendaciones y conclusiones.

### [1] DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE SECADO DE G.B.A.

Para este proceso se cuenta con 11 silos secadores, dispuestos longitudinal y paralelamente uno seguido de otro, ver figura 1, estos a su vez están provistos de elementos de limpieza, de transporte, carga y descarga

### AGUSTIN VALVERDE G.

MsC. Ingeniero Mecánico  
Director Grupo de investigación en Eficiencia Energética y Medio Ambiente (GEMA).  
Universidad de Ibagué.  
avalverde@nevado.cui.edu.co

### BIENVENIDO SARRIA LÓPEZ

PhD. Ingeniero Mecánico  
Centro de Estudio en Eficiencia Energética y Medio Ambiente (CEEMA).  
Universidad de Cienfuegos. Cuba  
bslopez2000@yahoo.es

tales como: Zaranda, prelimpiadora, elevadores de cangilones y transportadores de sin fin y de paletas.

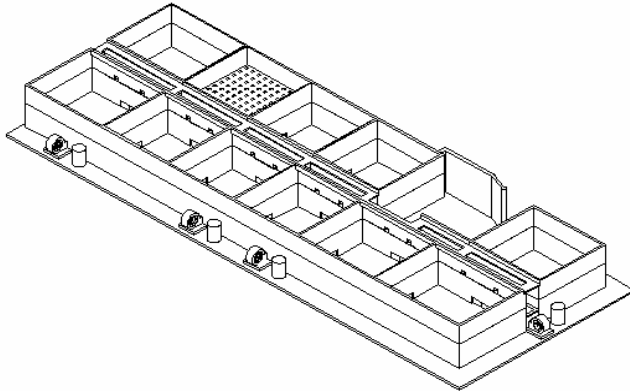


Figura 1. Distribución de silos secadores de G.B.A

Alternamente a estos elementos, también se cuenta con los respectivos dispositivos encargados de la generación, inducción y distribución del calor a través de dichos silos. La generación de calor se hace por medio de unos hornos (quemadores), los cuales tienen como función realizar la combustión del carbón coke (combustible utilizado para el proceso de secado) con el fin de aprovechar los gases calientes producidos por la misma.

Ya con los gases de combustión generados, el aire penetra al ventilador paralelamente al eje y se mueve radialmente a través de los alabes (acción centrífuga), donde su descarga se hace tangencialmente a la carcasa envolvente, granja buenos aires cuenta con 4 ventiladores centrífugos con flujos volumétricos de aproximadamente 4 m<sup>3</sup>/seg. encargados de la función antes mencionada. Estos ventiladores se encargan de insuflar el aire caliente a través de todos los silos, los cuales están intercomunicados como lo muestra la figura 1, Las secadoras (silos) tienen una capacidad aproximada de 30 toneladas, el flujo de aire proveniente del sistema quemador-ventilador (figura 1) es dirigido a través de ductos internos que comunican los silos entre si, es decir, un sistema quemador-ventilador esta en la capacidad de hacer fluir aire por 3 silos en promedio.

### 3. APLICACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE THOMPSON AL PROCESO ACTUAL DE SECADO

Existe correlación entre la humedad de los granos y la humedad del aire que los rodea. La presión de vapor del agua contenida en el grano y de la contenida en el aire, tiende a estar en equilibrio, trayendo como consecuencia, que el aire que rodea el grano afecte su humedad y la tasa de respiración del mismo.

Basado en este principio, se aplica un modelo matemático (THOMPSON et alii 1968) que simula el roceso de secado de granos por medio de un conjunto de ecuaciones basándose en estas leyes de transferencia.

A continuación se presentará la secuencia de cálculo del modelo:

**Paso 1.** Cálculo de la temperatura de equilibrio ( $T_e$ ) entre el aire y el grano, considerando solamente el cambio de calor sensible.

$$T_e = \frac{(0.24 + 0.45 \cdot W_o) \cdot T_o + C_p \cdot R \cdot (1 + U) \cdot T_{go}}{0.24 + 0.45 \cdot W_o + C_p \cdot R \cdot (1 + U)} \quad (1)$$

$$R = \frac{P \cdot V_e \cdot A \cdot D_x}{Q \cdot D_t \cdot 60 \cdot (1 + U_o)} \quad (2)$$

Donde:

$W_o$  = Razón de mezcla del aire a la entrada de la capa,

$Kg_{Agua}/Kg_{Aire\ seco}$

$T_o$  = Temperatura del aire a la entrada de la capa, °C

$C_p$  = Entalpía específica del grano, Kcal/Kg.°C

$R$  = Razón entre las masas de la materia seca y de aire seco, Kg/ Kg<sub>Aire seco</sub>

$T_{go}$  = Temperatura del grano actual, °C

**Paso 2.** Cálculo de la humedad relativa de aire (UR) en condiciones de equilibrio.

$$UR = \frac{100 \cdot P_{atm} \cdot W_o}{(0.622 + W_o) \cdot P_{vs}} \quad (3)$$

$P_{atm}$  = Presión atmosférica, mmHg

$P_{vs}$  = Presión de vapor de saturación a la temperatura  $T_e$ , mmHg

$$P_{vs} = 51.715 e^{\left[ 51.594 \frac{6834}{T_e + 273.16} - 5.169 \ln(T_e + 273.16) \right]} \quad (4)$$

**Paso 3.** Cálculo de la humedad de equilibrio ( $U_e$ ).

$$U_e = 1.206 \cdot \left[ \left[ \frac{-\ln(1 - 0.01 \cdot UR)}{T_e + 45.6} \right]^{0.5} \right] \quad (5)$$

**Paso 4.** Cálculo del tiempo equivalente ( $t_e$ ) en horas, este se define como el tiempo que el producto debería estar expuesto a las condiciones actuales del aire ( $T_e, W_o$ ) para que la humedad fuera reducida de un valor inicial ( $U_o$ ) a un valor actual ( $U$ ).

$$t_e = A \cdot \ln(RU) + B \cdot [\ln(RU)]^2 \quad (6)$$

en donde:

RU = Razón de humedad del producto

Apt y B parámetros obtenidos a partir de curvas de secado o por medio de las siguientes ecuaciones:

$$RU = \frac{U - Ue}{Uo - Ue} \quad (7)$$

U = Humedad final

Uo = Humedad inicial

Ue = Humedad de equilibrio.

$$Apt = -1.706 + 0.0088 \cdot Te \quad (8)$$

$$B = 148.7 \cdot e^{(-0.059 \cdot Te)} \quad (9)$$

**Paso 5.** Cálculo de la nueva razón de humedad del producto.

$$RUf = e^{\left[ \frac{-Apt - \left[ Apt^2 + 4 \cdot B \cdot (te + Dt) \right]^{0.5}}{2 \cdot B} \right]} \quad (10)$$

Dt = Intervalo de tiempo de secado, h

**Paso 6.** Cálculo de la humedad del producto, en el tiempo t + Dt

$$Uf = RUf \cdot (Uo - Ue) + Ue \quad (11)$$

**Paso 7.** Cálculo de la nueva razón de mezcla de aire, Wf, razón de mezcla de aire a la salida de la capa de granos, Kg<sub>Agua</sub>/Kg<sub>Aire seco</sub>

$$Wf = Wo + R \cdot (U - Uf) \quad (12)$$

**Paso 8.** Cálculo de las temperaturas finales del aire y del producto, en °C.

Asumiendo que la temperatura del grano es igual a la temperatura del aire decimos que:

$$Tf = \frac{(0.24 + 0.45 \cdot W_o) \cdot T_e - (Wf - W_o) \cdot (588 + DL \cdot T_e) + C_p \cdot R \cdot (1 + U) \cdot T_e}{0.24 + 0.45 \cdot Wf + C_p \cdot R \cdot (1 + U)} \quad (13)$$

Donde:

$$DL = (606 - 0.57 \cdot T_e) \cdot 4.35 \cdot e^{(-28.25 \cdot U)} \quad (14)$$

#### 4. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO.

Debido a que el grano con secado más crítico es el sorgo, el prototipo utilizó como materia prima este mismo. Una vez seleccionado el grano a secar se procede a estudiar el prototipo equivalente al proceso actual de secado y las diferentes alternativas.

**Silo normal.**

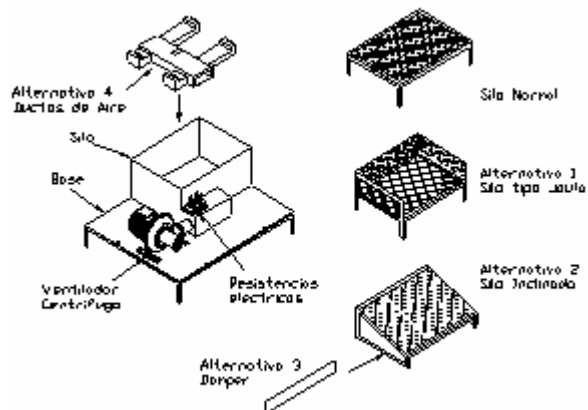


Figura 2. Prototipo y alternativas del proceso de secado de G.B.A

El objetivo de construir el prototipo con el silo normal es proporcionar un punto de referencia para comparar cada una de las diferentes alternativas y así poder evaluar que tan eficiente es cada una de ellas.

Las tomas de muestras se hicieron como lo muestra la tabla 1:

Seguimiento (min)	5	10	15	20	25	30	35	40	
Lugar de la muestra									PROMEDIO
°T <sub>GRANO</sub>	54	58	58	60	62	62,5	63	64,5	60,25
1s	14,7	14,6	14,5	14,1	13,6	13,6	12,7	12,1	13,7375
2s	14,8	14,8	14,5	13,6	13,3	13,2	12,6	12,3	13,6375
3s	14,8	14,4	13,9	13,7	13,4	12,7	12,5	11,5	13,3625
4s	14,5	14,5	14,2	13,5	12,9	13,1	12,7	12,1	13,4375
5s	14,4	14,4	14,4	13,9	13,4	13	12,5	12,1	13,5125
Promedio	14,64	14,54	14,30	13,76	13,32	13,12	12,60	12,02	

Tabla 1. Seguimiento de las tomas de las muestras en los diferentes puntos

Los puntos 1s, 2s, 3s, 4s y 5s se refiere a los distintos puntos de donde se toma la muestra y el seguimiento en tiempo (min) es el intervalo de la misma.

**Alternativa 1 – silo tipo jaula.**

Como segunda propuesta, el silo se modifica de tal manera que el aire tenga mayor área de contacto con el grano, la modificación consiste en abrir 3 ductos laterales de 30 milímetros de espesor y sellados en la parte superior, para lograr ello, como consecuencia se reduce el

área del silo, pero en compensación a esta reducción se recalcula la altura con el fin de no perder capacidad de almacenaje.

Haciendo el comparativo con el silo normal, el coeficiente de variación y el porcentaje de humedad reducido no presenta mejora alguna, la razón de ello es que la humedad necesita ser arrastrada perpendicularmente por el aire caliente insuflado, y con esta configuración las partes laterales arrastran el aire caliente y la humedad removida horizontalmente para la parte central del silo y no para arriba como debe de ser idealmente.

#### Alternativo 2 – silo inclinado.

Otra configuración geométrica corresponde a la inclinación de la criba del silo, teniendo como ventaja principal la fácil descarga del grano, evitando la utilización de bazucas (transportador de sinfín), para la evacuación del grano, para lograr esta inclinación se tuvo que calcular por medio de geometría básica el ángulo de inclinación ( $15^\circ$ ) teniendo en cuenta que la capacidad de almacenamiento permanezca constante.

#### Alternativa 3 – silo inclinado con Damper.

Un Damper que no es mas que una lamina colocada transversalmente al flujo de aire con el objetivo de dejar pasar en menor cuantía de flujo volumétrico a la parte donde la capa de granos es más delgada, con ello se busca que la parte mayor del flujo se dirija a la capa de granos más gruesa ya que necesita de mayor caudal de aire para remover la humedad, figura 2.

La modificación realizada con la ubicación del Damper (lamina transversal al flujo de aire, ver figura 2. en la parte central proporciona una leve mejora con respecto al silo inclinado pero con respecto al silo normal no lo hace, esto se debe a la diferencia de presión estática del grano entre la capa delgada y la capa gruesa, la diferencia es tal, que obliga a insuflar más aire por la parte delgada que por la capa gruesa, lo que hace ineficiente el sistema.

#### Alternativa 4 – Ductos de aire.

Como se pudo observar ni las modificaciones geométricas ni la ubicación del Damper presento resultados satisfactorios en cuanto a homogeneidad se refiere, por lo tanto el siguiente paso es colocar ductos con ubicaciones específicas que garanticen el mismo flujo volumétrico para todos los puntos de estudio del prototipo.

Después de iteraciones, calibración de ductos y toma de muestras el que mejor dio resultados fue el prototipo del silo normal pero con la adición de ductos de aire.

Como se observa en la figura 4 el coeficiente de variación se redujo a la mitad con respecto al coeficiente de variación del silo normal, sin ningún tipo de

modificación, ver figura 2, es decir que con la ubicación de los ductos el sistema es más homogéneo en un 50 % logrando de esta manera optimizar de manera eficiente el proceso de secado.

### 5. SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA CON BASE EN LOS RESULTADOS DE LAS MUESTRAS PROPORCIONADAS POR EL PROTOTIPO

La selección de la alternativa se hizo con base en los resultados obtenidos del análisis estadístico (tabla 1) que muestra la curva de secado (figura 3) y el coeficiente de variación (figura 4) de cada una de las propuestas presentadas en la figura 2.

$$CV = \frac{\text{Desviación Estándar}}{\text{Media}}$$

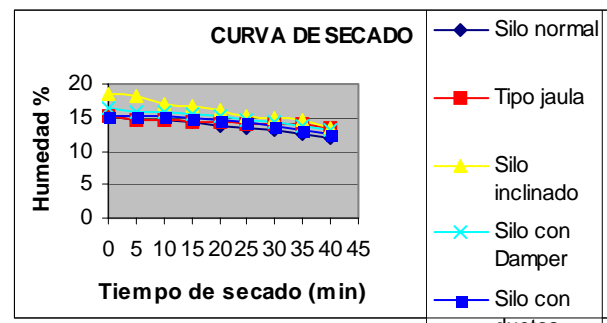


Figura 3. Curva de secado de las alternativas

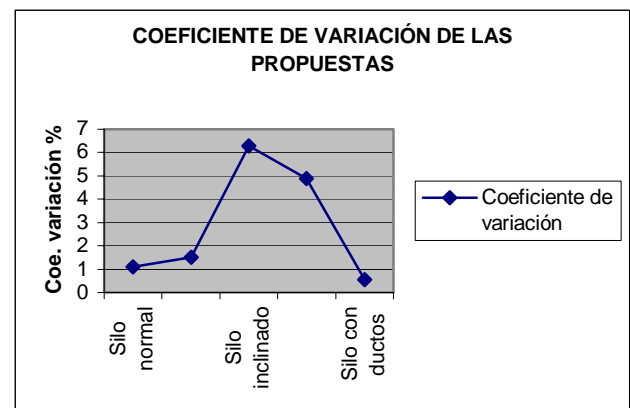


Figura 4. Curva de homogeneidad de las alternativas

En las figuras 3 y 4 se realiza una comparación de cada una de las alternativas, evidenciándose cual presenta el mejor comportamiento. De la figura 3 se observa que la alternativa 2 (silo inclinado) tiene el mejor comportamiento en cuanto a tiempo de secado se refiere, pero en la figura 4 se observa que también es la que presenta menor grado de homogeneidad, por lo tanto se descarta la selección de esta propuesta. La alternativa 3 (silo inclinado con Damper) presenta una leve disminución en el coeficiente de variación de humedad,

pero sin embargo sigue siendo elevada con respecto a las otras y por ende esta propuesta también queda rechazada.

En la alternativa 1 (silo tipo jaula) la velocidad de secado presenta una disminución al compararla con las otras alternativas, ya que transcurrido el tiempo de secado (40 minutos) el porcentaje de humedad solo bajo en 1.9%. Por otro lado, se observa que el silo normal, tiene una velocidad de secado aceptable y que en conjunto con la adición de ductos internos (Alternativa 4) presenta el mejor comportamiento de secado debido al bajo coeficiente de variación de humedad. Por lo tanto, la alternativa seleccionada es la numero 4 (silo normal con ductos internos), basados en esta selección se hace necesario realizar el cálculo de ductos correspondiente de cada silo teniendo en cuenta su capacidad volumétrica. Ahora bien, ya que el tiempo de secado no presentó una mejora significativa con la propuesta de la adición de los ductos, es necesario reubicar los ventiladores según la cantidad de grano que almacene el silo con el fin de aumentar la cantidad de aire que atraviese la capa de granos y por ende su velocidad de secado.

### 6. REUBICACIÓN DE LOS VENTILADORES DE LAS SECADORAS

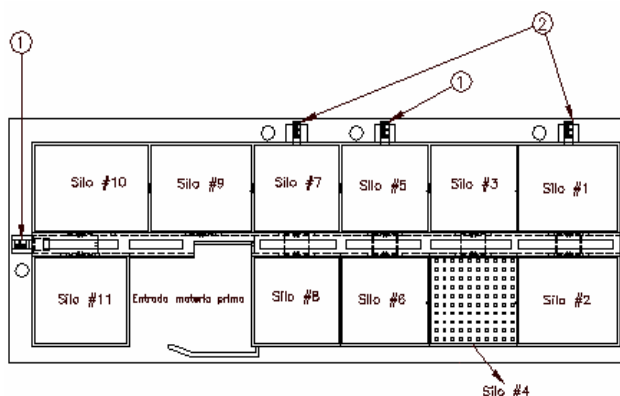


Figura 5. Proceso actual.

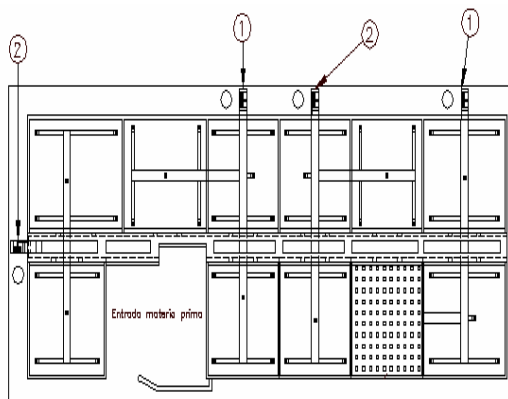


Figura 6. Proceso modificado.

### 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Un factor muy importante a detallar para cualquier tipo de almacenamiento, es que cuanto mejor es la calidad de los granos a almacenar mejor será su conservación. Con granos dañados y sucios (impurezas) el deterioro se incrementa significativamente, por este motivo se **recomienda** periódicamente realizar limpiezas en los ductos y partes internas de los silos, ya que en la actualidad se encuentran abandonados del respectivo mantenimiento que se merecen.

Es importante la organización a la hora de almacenar, por lo tanto se **recomienda** no mezclar en un mismo silo, grano con diferencias enmarcadas en su humedad de entrada, esto se presenta cuando se llena un silo de diferentes proveedores y como consecuencia esto alteraría los resultados de las muestras debido a su poca homogeneidad.

El mal estado de todos los quemadores de coke son una causa importante de baja eficiencia del sistema, debido a que las pérdidas de calor son considerables, se estima que se esta perdiendo alrededor del 30 o 40 % del calor total generado en el hogar del horno, por este hecho se **recomienda** cambiar los quemadores por unos de más alta eficiencia.

Los soportes de madera sobre los cuales descansan las mallas presentan una particularidad de diseño, que consiste en la poca área de contacto a la cual expone el grano debido a su configuración, por tal motivo se **recomienda** el cambio de estos al sistema de cerchas metálicas prestando especial cuidado a que el contenido de azufre producido por la combustión del coke, acelera considerablemente la oxidación y corrosión del metal que en consecuencia será transmitido al alimento, a causa de esto se hace necesario recubrir constantemente con pintura anticorrosiva con el fin de prevenir dicha oxidación, además de eso, su implementación se hace necesaria debido a que los soportes de madera no permiten la ubicación de los ductos que van sobre el suelo de los silos.

La homogeneidad se analizó desde dos puntos de vista, el primero, trató la parte interna del silo, es decir, la variación de la humedad en los diferentes puntos de un mismo silo, y el segundo se encargó de esta misma variación pero a nivel de todos los silos, por ello se formularon propuestas por separado considerando las variantes de cada caso.

### 8. BIBLIOGRAFIA

[1] CASTILLO, Alvaro. Almacenamiento de granos. Tercera edición, Ediagro Ltda. 2002.

- [2] CASTILLO, Alvaro y GAVIRIA Jaime. Molineria de Arroz en los Trópicos, Editor Alvaro Castillo 1999, Ediagro Ltda.
- [3] DALPASQUALE Valdecir Antonio, MARCAL DE QUEIROZ Daniel, MARQUES PEREIRA José Antonio y SINICIO Roberto. Secado de granos: natural, solar y a bajas temperaturas. FAO. Viale delle Terme di Caracalla. 1991.
- [4] HIBBERLER R. C.. Mecánica de Materiales. Tercera edición. Prentice Hall.1997.
- [5] INCROPERA Frank P. y DEWITT David P. Fundamentos de transferencia de calor. Cuarta edición,.Prentice Hall. 1999.
- [6] KARLEKAR B. V. Transferencia de Calor. Segunda Edición. McGraw Hill. 1994.
- [7] MATAIX Claudio. Mecánica de Fluidos y máquinas Hidráulicas. Segunda edición. Oxford 1999.