



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

APLICACIÓN DE UN MODELO NUMÉRICO PARA LA EVALUACIÓN DE UN SILO SECADOR DE GRANOS DE SOJA

Damián Bustamante ^{*1}, Matías Menchise ^{*1}, Pablo Marti ², Fernando Palmieri ¹,
Cristián Domínguez ¹ y Néstor Reina ¹

^{*1} Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad Regional San Nicolás
Universidad Tecnológica Nacional
Colon 332 San Nicolás Buenos Aires Argentina
correo-e: dhbustamante@frsn.utn.edu.ar, mmenchise@frsn.utn.edu.ar
² Bunge Planta Ramallo
Camino de la Costa Km 4,7 Ramallo Buenos Aires Argentina.

RESUMEN

El proceso de secado del grano de soja normalmente se realiza utilizando un equipo denominado secadora, que emplea un combustible para calentar aire. En el presente trabajo se evalúa la posibilidad de emplear las fuentes de calor disponibles de la planta industrial de Bunge Ramallo para convertir un silo de almacenamiento en un silo secador.

Para ello se procede a implementar un modelo numérico mediante un software de cálculo matemático para determinar la viabilidad de uso del silo existente como elemento de secado de granos y estimar la energía necesaria para este proceso.

Al analizar el secado de granos en un silo, se divide en lechos fijos, que a su vez se dividen en capas delgadas. En cada capa delgada las condiciones del aire de secado al atravesar la misma se supone que se mantienen invariables. Sin embargo un lecho fijo está formado por una gran cantidad de capas delgadas, lo que provoca que la humedad y la temperatura del aire sean función del tiempo y de la coordenada a lo largo del espesor del lecho, por lo que el secado del grano tienen distintas evoluciones dentro del silo.

La construcción de un modelo matemático que refleje el comportamiento del secado es bastante compleja, pero se presenta como una mejor alternativa frente a la experimentación física, que es costosa, dificultosa y demanda un tiempo considerable.

Luego de estudiar el modelo del silo, se realiza una evaluación energética de las fuentes de calor disponibles. Como resultado del estudio se obtiene que es posible usar el silo para el secado de los granos en lugar de la secadora y que los gases de combustión de las calderas existentes, son la alternativa a utilizar para llevar a cabo el proceso reduciendo el consumo de gas natural de la planta.

Palabras Claves: Secado de granos, modelo numérico, diferencias finitas, ecuaciones acopladas.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

1. INTRODUCCIÓN

En una planta de procesamiento de cereales, como ocurre en Bunge Ramallo donde la soja es empleada para obtener aceite, las semillas deben mantenerse libres de contaminantes y con una humedad adecuada para su procesamiento. La soja normalmente es recibida con un rango de humedad entre un 12,5 a 13,5 % y debe reducirse a valores del orden de un 9% para obtener un proceso de extracción de aceite mas eficiente. Es por ello que se debe someter a un proceso de secado y limpieza.

Los estudios acerca de los fenómenos físico intervinientes en el secado de granos han propuesto una serie de mecanismos físicos [1] para describir la transferencia de humedad en los granos de cereales hacia el medio que los rodea. Generalmente, se acepta que el agua se mueve dentro del grano en forma líquida y/o de vapor; y si bien dentro de una secadora convencional se presentan todos los distintos mecanismos físicos de secado en forma simultánea, el mecanismo predominante, es el de movimiento del agua en fase líquida desde el interior hacia la periferia del grano, luego, ya en la superficie el agua que logra salir del grano se evapora y es arrastrada por el aire que está circulando.

En todo proceso de secado es importante respetar las temperaturas máximas y velocidades de secado para no producir un deterioro de la calidad del grano. El sobre secado aumenta la susceptibilidad a la rotura del grano y produce una mayor pérdida de peso del mismo con un gasto innecesario de energía. Por lo contrario, el secado deficiente, hace al grano más susceptible al ataque de hongos e insectos.

En este trabajo se implementó un modelo numérico para hacer una evaluación inicial de la posibilidad de secar soja en un silo de acopio, mediante la insuflación de aire calefaccionado utilizando energía residual de otros procesos de la planta. De esta forma se pretende reducir o evitar el uso de la secadora aprovechando la energía disponible.

Existe una extensa literatura sobre la formulación de modelos numéricos para el secado de granos. La mayoría de los autores utilizan modelos de secado en lecho fijo de capas delgadas. Dichos modelos fueron presentados por Brooker [1] y Thomson [2], entre otros. En general, parten del uso de ecuaciones de balance de masa y energía, que complementan con distintas expresiones de empíricas para la transferencia de humedad del grano al aire, y finalmente aplican algún método numérico de resolución.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Actualmente se han desarrollado varios estudios donde se analizan secadoras u otros equipos usando estos modelos [3,4,5]. Normalmente en estos estudios se divide el lecho de granos en lechos fijos, compuestos de capas delgadas para las que se plantean las ecuaciones de pérdida de humedad y calentamiento de los granos y las de ganancia de humedad y de enfriamiento del aire.

En particular, se emplea aquí, un modelo de secado en lecho fijo siguiendo una formulación de las ecuaciones de balance similar a la propuesta por Srivastava [6] y empleando las expresiones de humedad del grano sugeridas por Balzi [5] para la soja, en base al ajuste que las mismas consiguen con datos experimentales publicados.

Si bien, en su trabajo, Srivastava [6] no presenta una correlación de los resultados de su modelo con datos experimentales, Soponronnarit [7] utiliza un modelo idéntico para estudiar los efectos de las variables de secado sobre el grano de soja y obtiene una muy buena correlación con los datos empíricos, no obstante, su estudio se limita a un lecho de espesor reducido.

Boeri [8], analiza la influencia de la velocidad y temperatura del aire en un secador experimental de soja utilizando un modelo numérico similar con excelentes resultados. Pero, su trabajo considera una expresión de variación de la humedad del grano que contempla la velocidad del aire circundante. Este detalle permite que el modelo ajuste mejor en ciertas situaciones, pero en el estudio aquí presentado, introduce una mayor dificultad que no conduce a una variación significativa en los resultados.

Otros modelos construidos usando las mismas ecuaciones que el modelos de Sivarasta han sido validados experimentalmente con excelentes resultados para depósitos de papas [9] y secadoras de maíz [10]. En general, en estos trabajos se emplearon métodos distintos de resolución matemática y además los espesores de secado eran menores.

2. MODELO DE SECADO DE GRANOS

En un proceso de secado en lecho fijo, el aire caliente asciende atravesando el lecho de granos y evacuando la humedad de la superficie del grano. A medida que pasa el tiempo, el lecho de granos tiende hacia el equilibrio, es decir, la presión de vapor de la superficie del grano busca equilibrarse con la del aire en todos los niveles.

Partiendo, entonces, de que no existe un equilibrio de calor, ni de transferencia de masa, entre el aire de secado y el grano, es posible desarrollar un conjunto de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, que involucran los cuatro parámetros (la humedad y temperatura del aire y la humedad y temperatura del grano).



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Tabla 1: Nomenclatura

a_{esp} : Área específica de transferencia [m^2/m^3]	T_g : Temperatura del grano [$^{\circ}K$]
a_v : Área superficial por unidad de volumen de partícula para una esfera $a_v = 3/ R$	T_{g0} : Temperatura inicial del grano [$^{\circ}K$]
A: Área transversal de silo [m^2]	ϵ : Porosidad
c_a : Calor específico del aire [$J/Kg^{\circ}K$]	ρ_a : Densidad del aire [Kg/m^3]
c_v : Calor específico del vapor [$J/Kg^{\circ}K$]	h_v : Calor latente de evaporación [J/Kg]
c_w : Calor específico del agua [$J/Kg^{\circ}K$]	ρ_p : Densidad del grano [Kg/m^3]
h_a : Coeficiente de transferencia por convección [$J/seg.m^2.^{\circ}K$]	V_a : Velocidad del aire [m/s]
H: Humedad del aire [$Kg_{Vapor}/Kg_{AireSeco}$]	M: Humedad del grano [$Kg_{agua}/Kg_{Materia\ Seca}$]
H_0 : Humedad inicial [$Kg_{Vapor}/Kg_{AireSeco}$]	M_e : Humedad de equilibrio del grano [$Kg_{agua}/Kg_{Materia\ Seca}$]
T_a : Temperatura del aire [$^{\circ}K$]	M_0 : Humedad inicial del grano [$Kg_{agua}/Kg_{Materia\ Seca}$]
T_{a0} : Temperatura inicial del aire [$^{\circ}K$]	dM/dt : Velocidad de secado.
	$MR = (M - M_e) / (M_0 - M_e)$: Relación de humedades
	D: Coeficiente de difusión [m^2/s]

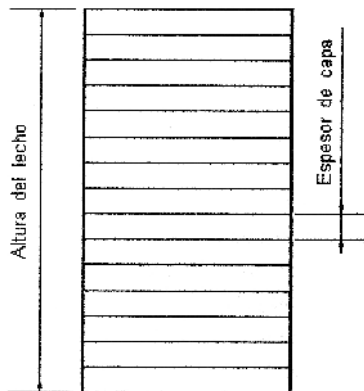


Figura 1: Esquema de un lecho fijo dividido en capas finas

Para estudiar los fenómenos que ocurren y resolver las ecuaciones, se considera que un lecho fijo está formado por una gran cantidad de capas delgadas de espesor regular (Figura 1), donde las condiciones del aire varían poco a través de la capa propiamente dicha, pero tiene variaciones considerables entre la entrada y salida del lecho. Excepto a la entrada de la primera capa, que recibe el aire siempre en las mismas condiciones, la humedad y la temperatura del aire serán función del tiempo y de la coordenada a lo largo del espesor del lecho.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

En el modelo se asume que: la contracción de volumen del grano es insignificante durante el proceso de secado; los gradientes de temperatura dentro de las partículas individuales y la conducción de partícula a partícula son insignificantes; las paredes del silo son adiabáticas con capacidad calorífica despreciable. y las capacidades caloríficas del aire húmedo y del grano son constantes durante períodos cortos de tiempo.

Considerando un volumen de control diferencial ($A dx$) en una posición arbitraria a lo largo del lecho, donde A es el área transversal de la capa delgada y dx es la altura de dicha capa, se procede a escribir los balances de energía y de masa correspondientes volumen de control.

2.1. Equilibrio de la entalpía del aire

Partiendo de la expresión de la entalpía del aire que ingresa al volumen de control:

$$\left(v_a A c_a T_a dx + v_a A c_w H T_a dx \right) dt \quad (1)$$

Considerando, además la entalpía del aire que abandona el volumen de control:

$$\left(v_a A c_a T_a dx + v_a A c_a \frac{\partial T_a}{\partial x} dx + v_a A c_w H T_a dx + v_a A c_w H \frac{\partial T_a}{\partial x} dx \right) dt \quad (2)$$

Donde se ha despreciado la variación de humedad del aire a través de la capa. Entonces resulta que la variación de energía del aire dentro del volumen de control ($A \cdot dx$) en el tiempo dt es:

$$\left[\left(c_a + H c_w \right) \frac{\partial T_a}{\partial t} A dx \right] dt \quad (3)$$

El cambio en el calor sensible del aire que se produce debido a la transferencia de calor por convección en el tiempo dt , es igual a:

$$q = h_a \cdot (T_a - T_g) \cdot a_{esp} \cdot A \cdot dx \cdot dt \quad (4)$$

Haciendo el balance de energías y simplificando, se obtiene una expresión aproximada de la variación de la temperatura con la altura del lecho:

$$\frac{\partial T_a}{\partial x} = \frac{h_a a_{esp}}{v_a (c_a + c_w H)} (T_a - T_g) + \frac{\partial T_a}{\partial t} \quad (5)$$



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Esta expresión fue propuesta siguiendo el razonamiento aquí presentado por Srivastava (6), en su trabajo reciente. Otros autores [5] proponen expresiones más complejas, que son útiles sólo cuando el aire experimenta una gran variación de humedad entre capas.

2.2. Equilibrio de la entalpía del grano

La entalpía cedida por el aire al grano debido al intercambio de calor por convección en el volumen de control ($A dx$), determinada por (4), es igual al calor necesario para la evaporación del agua en los granos, mas el calor para calentar el vapor de agua a extraer de los granos y el calor acumulado por los mismos.

La entalpía necesaria para la evaporación del agua superficial en el tiempo dt es:

$$h_{v-a} v_a \frac{\partial H}{\partial x} A dx dt \quad (6)$$

La entalpía de calor sensible para evaporar el agua contenida en los granos en el tiempo dt es:

$$v_a \frac{\partial H}{\partial x} A dx c_v (T_a - T_g) dt \quad (7)$$

El calor acumulado en los granos es:

$$(1 - \epsilon) (\rho_p c_p + \rho_p c_w M) \frac{\partial T_g}{\partial t} A dx dt \quad (8)$$

El balance de entalpía del grano sobre el volumen de control es:

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = \frac{h_{a-esp}}{(1 - \epsilon) (\rho_p c_p + \rho_p c_w M)} (T_a - T_g) - \frac{[h_v + c_v (T_a - T_g)] v_a}{(1 - \epsilon) (\rho_p c_p + \rho_p c_w M)} \frac{\partial H}{\partial x} \quad (9)$$

2.3. Balance de la humedad del aire

La cantidad de agua que entra y deja el volumen de control ($A dx$) es igual a la variación de la humedad del aire y de la humedad en los granos. La cantidad de agua que entra en la capa que se usa como volumen de control en un intervalo de tiempo es:

$$v_a H A dx dt \quad (10)$$



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

La cantidad de agua que deja el volumen de control de la capa considerada en $x+dx$ es:

$$V_a \left(H + \frac{\partial H}{\partial x} \right) dx dt \quad (11)$$

La variación de la humedad del aire dentro del volumen de control es:

$$A dx \frac{\partial H}{\partial t} dt \quad (12)$$

La variación del contenido de humedad de los granos sobre el volumen de control ($A \cdot dx$) es:

$$(1 - \epsilon) A dx \frac{\partial M}{\partial t} dt \quad (13)$$

Realizando el balance de masa para la humedad del aire y simplificando se obtiene:

$$\frac{\partial H}{\partial x} = - \frac{\partial H}{V_a \partial t} - \frac{(1 - \epsilon) \partial M}{V_a \partial t} \quad (14)$$

2.4. Humedad del grano

La humedad de equilibrio del grano M_e y la velocidad de secado dM/dt ; se obtienen principalmente de expresiones empíricas. Normalmente los autores [4,5,6,7] proponen la ecuación de Thompson como la más adecuada para la humedad de equilibrio de la soja. Partiendo de esta expresión se toman los modelos de difusión propuestos en la literatura [3,5] y se obtienen dos expresiones de la velocidad de secado en función de la fuerza impulsora $(M - M_e)$ en cada capa del lecho, la primera de ellas se emplea para tiempos de secado largos es decir cuando $a_v \cdot \sqrt{D \cdot t} > 1$ y cuando los valores de la relación de humedades $MR < 0.3$:

$$\frac{dM}{dt} = -(M - M_e) \frac{2}{9} a_v^2 D \quad (15)$$

No obstante, para un rango más amplio cuando $a_v \cdot \sqrt{D \cdot t} < 1$ y cuando los valores de la relación de humedades $0.2 < MR < 1$ se emplea la expresión de Becker [5]:

$$\frac{dM}{dt} = -(M - M_e) \cdot \frac{a_v \cdot \sqrt{\frac{D}{t}} - 0,331 a_v^2 D}{\left(1 - \frac{2}{\sqrt{a_v \cdot \sqrt{D \cdot t}} + 0,331 a_v^2 D t}\right)} \quad (16)$$



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

2.5. Solución numérica

Las Ecuaciones (5) y (14) son ecuaciones diferenciales en derivadas parciales de primer orden que tienen, a la temperatura del aire como variable dependiente (T_a) en el primer caso, y a la humedad del aire (H) en el segundo, ambas como funciones del largo de la cama (x) y el tiempo (t). La ecuación (9) es una ecuación diferencial ordinaria de primer orden que tiene como variable dependiente la temperatura del grano (T_g) y como variable independiente el tiempo (t). Las Ecuaciones (15) y (16) son ecuaciones diferenciales ordinarias que incluyen una expresión empírica. Estas ecuaciones se aproximan utilizando diferencias finitas en un dominio comprendido por la altura de la cama y el tiempo, como se muestra en la figura 2 y se resuelven utilizando el método de Runge-Kutta para las ecuaciones diferenciales ordinarias y el método de diferencias implícitas hacia atrás para las ecuaciones en derivadas parciales.

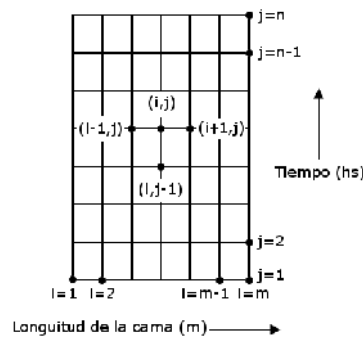


Figura 2: Esquema del método de diferencias finitas

Las condiciones iniciales y de contorno propuestas son

$$\begin{aligned} \text{Para } t=0, \rightarrow T_a = T_{a0}, \quad T_g = T_{g0}, \quad H = H_0, \quad M = M_o \\ t > 0, \quad x = 0, \rightarrow \begin{cases} \frac{\partial T_a}{\partial x} = 0 \\ T_a = T_{a0} \end{cases}, \quad \begin{cases} \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \\ H = H_0 \end{cases} \end{aligned} \quad (17)$$

3. RESULTADOS DEL MOLDELO NUMÉRICO.

El modelo numérico se resolvió para el secado de un silo con 150tn de soja que inicialmente se encontraba a 20 °C y con un 13 % de humedad, mediante la insuflación de aire a 70 °C con una humedad de 0,0103 Kg_{Vapor}/Kg_{AireSeco} equivalente a un 20 % de humedad relativa. A partir de las pruebas con el modelo, se determinó, que el flujo másico de aire por unidad de área transversal de



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

silo, necesario para el secado, debe ser de $0,5\text{kg/m}^2\text{seg}$. La altura del silo es de 23 metros y el tiempo del estudio de 24hs. En la figura siguiente se muestra la distribución de la temperatura de los granos en función de la altura del silo para distintas horas de tiempo de secado.

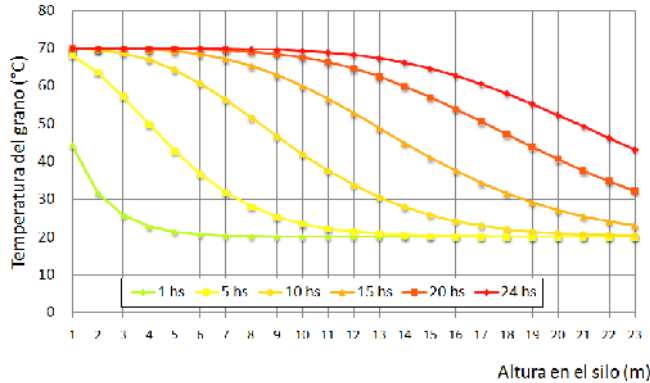


Figura 3: temperatura de los granos

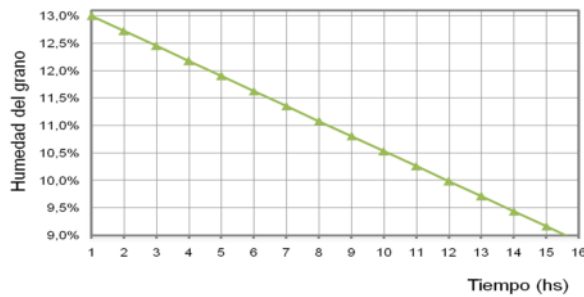


Figura 4: humedad del grano de la parte superior del silo en función del tiempo

En la figura 4 se muestra la humedad del grano en función del tiempo para la capa mas alta, y en la figura 5 se muestra los resultados de la humedad luego de 15hs de secado en función de la altura.

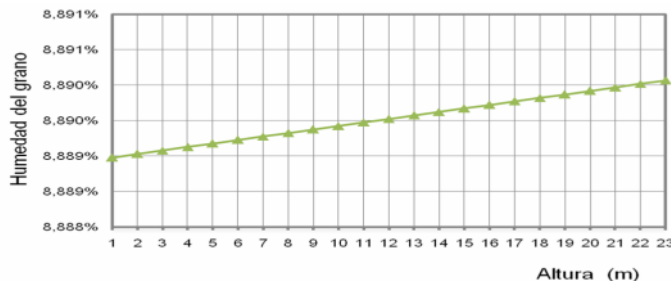


Figura 5: humedad en función de la altura dentro del silo luego de 15hs de secado



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

De las gráficas obtenidas del modelo se puede observar que el proceso de secado del grano es muy lento, favoreciendo la absorción del agua de su interior. Además al cabo de 15 hs de proceso se obtiene una humedad final de los granos de 9 % que es la humedad requerida.

4. EVALUACIÓN DE LAS FUENTES DE CALOR DISPONIBLES

Como ya se mencionó, a partir del modelo de silo, se determinó que para lograr un secado correcto es necesario un flujo másico de aire de 0,5 Kg/seg a 70°C por cada m² de área transversal de silo, considerando que los silos tienen un diámetro de 10,5m aproximadamente, se requiere un caudal másico de aire de 43 Kg/seg por cada silo, por lo tanto, la cantidad de energía necesaria equivalente es 2.300 KJ/s.

Para la selección de la fuente de energía a utilizar, para acondicionar el aire atmosférico e insuflarlo en el interior de los silos, se evaluaron las fuentes disponibles. Estas fuentes eran cuatro: los gases de combustión de las tres calderas de proceso de la planta, el vapor residual de baja presión de los procesos de planta, el vapor residual de alta presión o el flujo de condensado de los diferentes procesos.

Se emplearon cálculos de balance término y mediciones de proceso sobre las temperaturas y los caudales de los fluidos en cada fuente posible y de estos cálculos se obtiene que la energía disponible en los gases de combustión de las tres calderas era la única suficiente para calentar el aire a insuflar en los silos, y tiene una energía disponible de aproximadamente de 16.300 KJ/s.

5. CONCLUSIONES

En una primera aproximación, el modelo numérico indica que es posible realizar el secado del grano dentro del silo de acopio de la planta, hasta alcanzar la humedad óptima para los procesos posteriores, insuflando aire a 70°C durante 15hs.

La única fuente de calor disponible en la planta con energía suficiente para el secado, es la correspondiente a los gases de combustión de las calderas del proceso de la aceitera.

Es factible continuar con un estudio más detallado para formular un proyecto de convertir los silos de la planta en silos secadores, permitiendo de esta manera, aprovechar los gases calientes que actualmente son liberados a la atmósfera y reduciendo en consecuencia, el consumo de gas por el uso de la secadora.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

6. REFERENCIAS

- [1] D.B. Brooker, F.W. Bakker-Arkema y C.W. Hall, Drying cereal grains, The AVI Publishing Co. 1974.
- [2] T.L. Thomson, R. M. Peart y G. H. Foster, Mathematical Simulation of corn Drying- A new Mode Transactions of the ASAE **Vol.** 11- N° 4 pp 582-586, 1968.
- [3] R.M. Torrez Irogoyen, Diseño de un proceso térmico de fluidización para la producción de soja crocante, Tesis doctoral presentada en la Facultad de ingeniería de la Universidad e la Plata, La Plata, 2013.
- [4] J. A. Díaz Martínez, Modeling of grain dryers: thin layers to deep beds, Thesis submitted to McGill University in partial fulfillment of the requirements of the degree of M.Sc. Bioresource Engineering Department, McGill University, Montreal, 2011.
- [5] U. Balzi y J. Luzzi, Simulación del secado de soja en secadoras de flujo cruzado, Trabajo de grado presentado en la Facultad de ciencias Exactas, Ingeniería y agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario, 2006.
- [6] V.K. Srivastava y J. Jhon, Deep bed grain drying modeling, Energy Conversion and Management **Vol.** 43 pp 1689–1708, 2002.
- [7] S. Soponronnarit, T. Swadisevi, S. Wetchacama y W. Wutiw WATCHAI, Fluidised bed drying of soybeans, Journal of Stored Products Research **Vol.** 37 pp 133–151, 2001.
- [8] C.N. Boeri y O. Khatchatourian, Numerical simulation to describe the soybean Glycine max (L.) drying process: Influence of air velocity, temperature and initial moisture content, International Journal of Mechanical Engineering **Vol.** 2 (2) pp 30–41, 2012.
- [9] M. Staki , M. Banjac y T. Uroševi , Numerical study on hygroscopic material drying in packed bed, Brazilian Journal of Chemical Engineering **Vol.** 28 (2) pp 273-284, 2011.
- [10] M. Staki , y E. Tsotsas, Model-Based Analysis of Convective Grain Drying Process. Drying Technology **Vol.** 23 (9-11) pp 1895-1908, 2005.