

## Diseño y modelización de equipo para el estudio del secado convectivo de granos de origen agrícola II

Casiello, Francisco; Galaretto, Oscar; Farías, Ana María; Herrera, Luis Alberto; Hollmann, Diego; Castagnani, German.

Departamento de Investigación Institucional – Facultad de Química e Ingeniería del Rosario

Pontificia Universidad Católica Argentina – Campus Rosario

### Resumen:

En el presente trabajo se avanzará con la evaluación teórica, diseño, modelización de control y construcción de una secadora de granos piloto con el fin de realización de estudios y ensayos para identificar posibles ahorros de energía durante el proceso en las diferentes condiciones ideales a los efectos de tener un valor de referencia al momento de la operación. Este proyecto forma parte de un proyecto de investigación institucional más amplio, denominado “Optimización de energía en procesos de post cosecha de granos de origen agrícola”, dirigido a desarrollar temas vinculados a la actividad industrial en la zona núcleo agropecuaria, donde se encuentra ubicada la Facultad. Estos valores, basados en una comprensión más profunda de los fenómenos de transferencia involucrados deben ayudar a lograr diseños y procesos que tengan el ahorro de energía que, como se sabe, es muy importante en esta etapa de la industrialización de granos.

**Palabras clave:** Secadoras industriales, optimización energética, granos de origen agrícola, modelización de variables de control.

### Abstract:

In this paper, the theoretical evaluation, design, control modeling and construction of a pilot grain dryer will be advanced in order to carry out studies and tests to identify possible energy savings during the process in the different conditions ideal for this purpose. of having a reference value at the time of the operation. This project is part of a broader institutional research project, called “Optimization of energy in post-harvest processes of grains of agricultural origin”, aimed at developing issues related to industrial activity in the agricultural core area, where the Faculty. These values, based on a deeper understanding of the transfer phenomena involved, should help achieve designs and processes that have the energy savings that, as is known, is very important in this stage of grain industrialization.

**Keywords:** Industrial dryers, energy optimization, grains of agricultural origin, modeling of control variables.

## 1. Introducción

El secado artificial produce la principal transformación del grano en lo que llamamos la post- cosecha y a su vez es el procedimiento que más atención requiere para no afectar la calidad del mismo. Su objetivo fundamental es lograr que, durante el almacenamiento, el grano conserve sus características por el mayor tiempo posible. Para ello, el proceso de secado de granos debe dar respuesta a cuatro requerimientos:

- 1) Disminuir el contenido de agua en los granos
- 2) Evitar la germinación de las semillas
- 3) Conservar la máxima calidad del grano
- 4) Alcanzar un grado de humedad que no permita el crecimiento de bacterias y hongos, y, que retarde considerablemente el desarrollo de ácaros e insectos

El mismo puede realizarse con aire natural o con aire caliente, sin embargo la temperatura que el grano adquiere durante el proceso de secado es fundamental para determinar si el mismo mantiene su calidad inicial. Todos los métodos utilizados para secar granos emplean la propiedad del aire de absorber humedad, contenido de humedad del producto y la humedad relativa del aire. La humedad del aire debe ser menor a la humedad final requerida. Otra condición importante es la temperatura del aire ya que como sabemos el aire caliente seca con más rapidez el grano que el aire frío.

Es casi imposible secar el grano por completo, debido a que la semilla retiene, en promedio, el 10% de la humedad. El grano puede almacenarse a salvo con esta cantidad de agua. En muchos casos, eliminar esta última cantidad de agua puede dañar el grano. Las secadoras de flujo continuo son las comercialmente más empleados en la actualidad. En ellas el grano se introduce y descarga en forma continua o intermitente, permaneciendo constantemente llenas las secciones

de secado y enfriamiento. Las operaciones de secado y enfriamiento se efectúan en forma simultánea e ininterrumpida. El grano recorre las mismas desde arriba hacia abajo y pueden ser clasificadas de acuerdo al tipo de flujo en:

- a) Las secadoras de flujo mixto, también llamadas de "caballetes", tienen como elemento principal, en las zonas de secado y enfriamiento, un conjunto de conductos en forma de V invertida, por donde circula el aire caliente o frío.
- b) Las de flujo cruzado, también llamadas "de columnas" poseen columnas o venas rectas por donde circula por gravedad el grano; las columnas están formadas por paredes de chapas perforadas, las que atraviesa el aire caliente (o frío) en forma cruzada o perpendicular al espesor de la columna.

Generalmente el secado del grano suele convertirse en un cuello de botella para la industria ya que además de ser costoso, es por lo dicho anteriormente, potencialmente peligroso para la calidad del grano. Es por ello que las instalaciones de secado representan inversiones importantes medidas en tonelada de grano procesado.

No debemos perder de vista que del total de la energía utilizada en el proceso de producción de granos, el secado insume alrededor del 50%. Por lo que tomando en cuenta estos dos factores, calidad y consumo de energía, se puede apreciar claramente la importancia que adquiere este proceso. Debemos tener en cuenta que el precio de la secadora representa alrededor del 45% del costo total de una instalación de secado, ya que además debemos pensar en la noria elevadora, en el silo de grano húmedo, en la provisión de combustible, en los ciclones o elementos filtrantes para polvo (cada vez más importantes en términos del cuidado del medioambiente), plataformas de descarga, balanza, etc.

El interés de este proyecto, sin embargo, se centra en la determinación del consumo energético durante el proceso de pos-cosecha y el diseño de acciones tendientes a la minimización de este consumo. A pesar de que el secado es uno de los procesos más empleados a nivel industrial, todavía se desconocen muchos aspectos relacionados con las etapas y mecanismos aplicados en el mismo. Esto se debe en general a la complejidad de las estructuras de los materiales a secar.

## **2. Construcción del Equipo**

El equipo que construimos es una secadora vertical de flujo mixto, también llamada de caballetes, que tiene como elemento principal, en las zonas de secado y enfriamiento, un conjunto de conductos en forma de V invertida, por donde circula el aire caliente o frío.

### **2.1. Detalles de la construcción**

Para esta etapa de investigación nos enfocaremos en la construcción del equipo reutilizando partes donadas a la Facultad por empresas de la zona. Estas serán adaptadas a las necesidades específicas del diseño adicionando otras partes específicas según los cálculos realizados por alumnos de 5to año Ingeniería Industrial que participan del proyecto.

#### **Partes componentes básicas**

- ✓ Calentador eléctrico
- ✓ Lecho prismático
- ✓ Tolva de carga
- ✓ Boquilla de salida
- ✓ Ventilador para movimiento flujo de aire caliente
- ✓ Filtro ciclónico de partículas sólidas.
- ✓ Estructura/cuerpo soporte de secado.

La descarga de granos será facilitada por un mecanismo de sin fin accionado por un motoreductor eléctrico cuyo control de velocidad será fundamental para determinar el tiempo de permanencia de la carga dentro del equipo. Por su parte, el aire húmedo en la salida del equipo se hace pasar por un filtro ciclónico a los efectos de suprimir el polvillo en suspensión que pudiera arrastrarse luego de su intercambio de calor con el grano y desprendimiento de cascarilla ubicada sobre la superficie de estos. En etapas posteriores a este trabajo se avanzará con el desarrollo de un sistema de automatización de la operación del equipo. Durante esta etapa de diseño y construcción en particular ciertas partes del equipo, se tendrán en cuenta factores importantes que hacen a la preservación de la calidad del grano que se introduce en el proceso, como ser fisuras y roturas producidas por cambios bruscos de temperatura y daño mecánico, pérdida del poder germinativo, aumento del nivel de impurezas, etc.

### 3. Obtención de ecuaciones para determinar la velocidad límite de la partícula de finos en suspensión dentro del lecho de granos.

En una secadora por gravedad los gases de secado circulan a través de un lecho móvil formado por partículas sólidas, las cuales son introducidas por la parte superior y removidas por la parte inferior de la secadora. Las dos fases, la sólida y la gaseosa, fluyen. El sólido está sumergido y rodeado por el fluido y existe una velocidad relativa entre las dos fases. Para que una partícula se mueva a través de un fluido, se requiere la existencia de una diferencia de densidad entre la partícula y el fluido y una fuerza externa que comunique a la partícula un movimiento relativo respecto del fluido, que, en este caso, es la gravedad.

Sobre una partícula que se mueve a través de un fluido actúan tres fuerzas: una fuerza externa, de gravedad o centrífuga; la fuerza de flotación, que actúa paralela a la fuerza externa pero en dirección opuesta; y la fuerza de frotamiento, que aparece siempre que existe movimiento relativo entre la partícula y el fluido. Cuando la dirección del movimiento de la partícula respecto del fluido no es paralela a la dirección de las fuerzas externas y de flotación, la fuerza de frotamiento forma un ángulo con las otras dos. En este caso, que recibe el nombre de movimiento bidimensional, y el frotamiento hay que expresarlo en función de sus componentes. Durante el año 2017 se realizó búsqueda bibliográfica y traducción de artículos y capítulos de libros, que permitan la revisión de las ecuaciones básicas del flujo de fluidos y de las leyes elementales de la física y de la química aplicables al flujo de un fluido a través de un lecho sólido móvil, con movimiento bidimensional.

En el transcurso del año 2018 se profundizó sobre lo visto el año anterior, con el objetivo de obtener ecuaciones que permitan determinar la velocidad límite de la partícula en sedimentación libre y en sedimentación impedita; la velocidad del fluido, la caída de presión y el rozamiento sobre las partículas en movimiento, completamente suspendidas, es decir, cuando la suspensión se comporta como un lecho fluidizado. En esta año 2019 se avanzó con la construcción de la carpintería metálica hasta dejar armado el cuerpo, pre-tolva de ingreso de granos, haz convectivo y plataformas de acceso. El diseño, la ingeniería de detalle y la construcción de la máquina fue llevada a cabo el grupo de alumnos del último año de la carrera Ingeniería Industrial como consigna del proyecto final, con el apoyo de la cátedra de las asignaturas Proyecto de Planta y Trabajo Final. En cuanto al equipo, estamos hablando de un diseño de secadora vertical de flujo mixto, también llamada de caballetes, que tiene como elemento principal, en las zonas de secado y enfriamiento, un conjunto de conductos en forma de V invertida, por donde circula el aire caliente o frío.

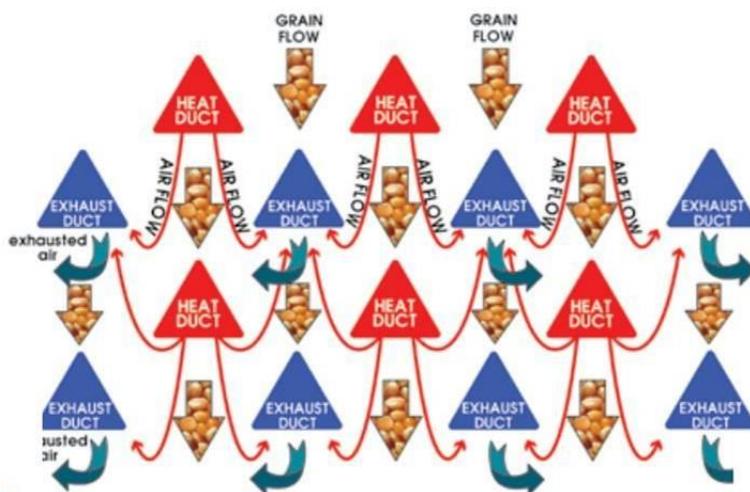


Figura 1: Detalle de flujo de granos e intercambio de aire caliente

La difusión de este tipo de secadoras se ha originado por la mejor uniformidad de secado que manifiestan en comparación con otros tipos de máquinas. Esta superioridad se explica porque estas secadoras aplican el flujo cruzado y también los principios de flujo concurrente y contracorriente.

El grano se introduce por la parte superior y se descarga en forma continua o intermitente por la parte inferior, permaneciendo constantemente llenas todas las secciones del equipo. Las operaciones de secado y enfriamiento se efectúan en forma simultánea e ininterrumpida durante el tiempo de residencia de la carga. El calor necesario para evaporar el agua contenida en el cereal es suministrado por un banco de resistencias eléctricas que se ocupa de calentar el flujo de aire que un forzador toma del ambiente e introduce en la cámara de entrada del equipo, de manera mucho

más limpia y segura que si se hiciera mediante la quema de un combustible líquido o gaseoso.

Una secadora convencional de este tipo, correctamente construida, utilizada y mantenida tiene un consumo energético de poco más de 1000 kcal/kg de agua evaporada. Esta cantidad se compone aproximadamente de la siguiente manera:

La descarga de granos será facilitada por un mecanismo de sin fin accionado por un motorreductor eléctrico cuyo control de velocidad será fundamental para determinar el tiempo de permanencia de la carga dentro del equipo.

Por su parte, el aire húmedo en la salida del equipo se hace pasar por un filtro ciclónico a los efectos de suprimir el polvillo en suspensión que pudiera arrastrarse luego de su intercambio de calor con el grano.

Etapas posteriores de este trabajo tendrán por objeto el desarrollo de algún sistema que permita automatizar la operación del equipo. Teniendo en mente este propósito se dispondrán diferentes instrumentos que permitan medir de manera continua una serie de parámetros del proceso, como ser humedad y temperatura de entrada y salida del aire, la velocidad de descarga del grano, etc.

De mismo modo, al momento del diseño de ciertas partes del equipo, se tendrán en cuenta factores importantes que hacen a la preservación de la calidad del grano que se introduce en el proceso, como ser fisuras y roturas producidas por cambios bruscos de temperatura y daño mecánico, pérdida del poder germinativo, aumento del nivel de impurezas, etc.

#### 4. Balance de materia y energía

En la figura siguiente se puede observar un diagrama de flujo de las corrientes de entrada y salida en la secadora:

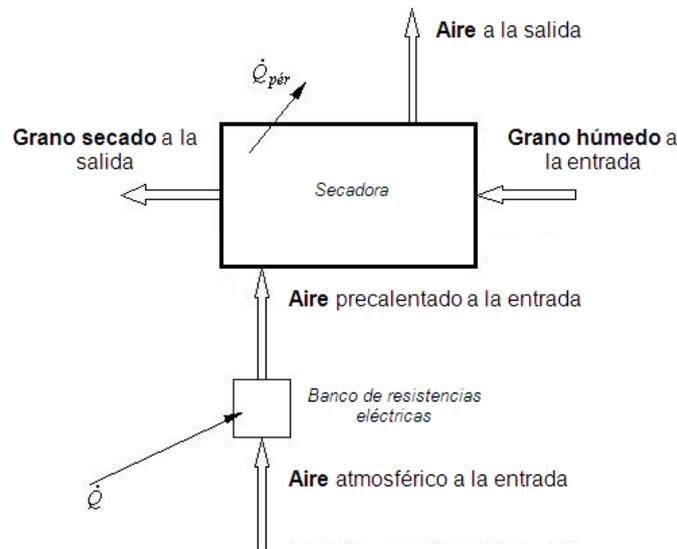


Figura 2: Detalle del balance de materia y energía

#### Cálculo de la cantidad de agua a evaporar en el proceso

La cantidad de grano húmedo a procesar es:

$$\dot{G}_e = 200,0 \text{ kg/h (CAPACIDAD ADOPTADA PARA EL DISEÑO)}$$

El contenido de humedad para los granos a la entrada es:

$$X_e = 0,170 \text{ kg agua/kg sólido húmedo}$$

Considerando el flujo total y el contenido de humedad indicado se puede calcular el flujo de sólido seco que atraviesa el equipo:

$$\dot{G}_{se} = 200,0 \text{ kg/h} \times (1 - 0,17) = 166,0 \text{ kg/h}$$

Realizando un balance de masa total (Treybal, 1980), se puede calcular la cantidad de agua que ingresa con los granos húmedos:

$$\dot{W}_{ge} = 200,0 \text{ kg/h} - 166,0 \text{ kg/h} = 34,0 \text{ kg/h}$$

Por otra parte, a la salida del equipo tendremos granos secados con un remanente de humedad de:

$$X_s = 0,135 \text{ kg agua/kg sólido húmedo}$$

Debe tenerse presente que cuando se seca un grano sólo se pierde agua, no se pierde materia seca, excepto el caso que en la secadora se rompa mucho grano y que parte de él sea eliminado por el aire usado en forma de polvo o granza, pero normalmente, ésta no es una circunstancia muy común ni alcanza valores representativos.

Asumiendo que la merma en la cantidad de sólidos secos es despreciable, calculamos la cantidad de granos secados que salen del equipo:

$$\dot{G}_{ss} = \dot{G}_{se} = 166,0 \text{ kg/h}$$

$$\dot{G}_s = 166,0 \text{ kg/h} / (1 - 0,135) = 191,9 \text{ kg/h}$$

Y finalmente obtenemos la cantidad de agua que se evapora en el proceso:

$$\dot{W}_{gs} = 191,9 \text{ kg/h} - 166,0 \text{ kg/h} = 25,9 \text{ kg/h}$$

$$\dot{W}_{evap} = \dot{W}_{ge} - \dot{W}_{gs} = 34,0 \text{ kg/h} - 25,9 \text{ kg/h} = 8,1 \text{ kg/h}$$

### Cálculo del consumo energético requerido por el proceso

Una secadora convencional de este tipo, correctamente construida, utilizada y mantenida tiene un consumo energético de poco más de  $1000 \text{ kcal/kg}$  de agua evaporada. Esta cantidad se compone aproximadamente de la siguiente manera:

Calor necesario para la evaporación de 1 kg de agua	600 kcal
Pérdida por el calor sensible que se va en el aire usado	320 kcal
Pérdidas de calor por conducción, radiación y convección hacia el exterior	30 kcal
Pérdida por el calor transportado por el grano	80 kcal
Total	1.030 kcal/kg

De este modo podemos calcular el consumo energético asociado a la evaporación de la cantidad de agua determinada anteriormente y tener una buena aproximación de la cuantía de la energía que se pierde en el proceso:

$$\dot{Q} = 8,1 \text{ kg agua/h} \times 1.030 \text{ kcal/kg agua} = 8335,3 \text{ kcal/h}$$

$$\dot{Q}_{per} = 8,1 \text{ kg agua/h} \times 430 \text{ kcal/kg agua} = 3479,8 \text{ kcal/h}$$

### Cálculo del caudal de aire de la secadora

Conocida la cantidad de agua a evaporar y calculado el consumo energético, es útil determinar la cantidad de aire necesario para transportar la cantidad de calor ya establecida sin superar una **temperatura** de trabajo prefijada.

El cálculo, en  $\text{m}^3/\text{min}$ , se puede hacer con la siguiente fórmula:

$$\text{caudal } [\text{m}^3/\text{min}] = \frac{\text{consumo energético } [\text{kcal/h}]}{\Delta t \times 17}$$

dónde:

$\Delta t$ : diferencia entre la temperatura del aire de secado y la temperatura ambiente

17: constante de Foster

Suponiendo que la temperatura de aire de secado es de 100°C y la del ambiente de 20°C resulta:

$$\text{caudal de aire} = \dot{A}_e = \frac{8335,3 \text{ kcal/h}}{80 \times 17} = 6,13 \text{ m}^3/\text{min}$$

### Cálculo de las características del aire usado a la salida del equipo

La humedad relativa del aire es el porcentaje de humedad que posee en ese momento, en relación con el máximo contenido de humedad que podría tener en esas condiciones. Cuando se dice que el aire tiene 75% de HR, quiere decir que le faltan 25% para llegar al máximo de humedad. Pero la humedad que puede contener como máximo un aire depende de la temperatura a que se encuentre. Cuanto más caliente se encuentre el aire, mayor es la cantidad de humedad que puede recibir.

Por este motivo, la humedad relativa del aire ambiente no es muy importante en el secado con aire caliente, pero sí lo es en el secado con aire natural o a baja temperatura. En el secado con aire caliente, la HR que tiene importancia es la del aire de secado.

El aire caliente comúnmente utilizado en el secado de granos (entre 90 y 140°C) tiene una HR muy débil (entre 0,5 y 2%) y es entonces, muy ávido de humedad. Hasta saturarse totalmente, es decir, para llegar al 100% de HR, puede acumular una gran cantidad de humedad, que la va a quitar al grano en poco tiempo. Por lo expresado y a los efectos de nuestro proyecto, adoptamos una masa de aire precalentado a la entrada del secador, con las siguientes características:

$$T_e = 100^\circ\text{C} \quad H_{Re} = 2\%$$

Mediante el uso de la carta psicrométrica para altas temperaturas (figura 1) obtenemos el contenido de humedad y el volumen específico del aire en esas condiciones:

$$Y_e = 0,012 \text{ kg agua/kg aire seco}$$

$$V_e = 1,075 \text{ m}^3/\text{kg aire seco}$$

Luego, en función del caudal de aire necesario en la secadora, tenemos a la entrada los siguientes caudales de aire seco y vapor de agua:

$$\begin{aligned} \dot{A}_{se} &= \frac{\dot{A}_e}{V_e} = \frac{6,14 \text{ m}^3/\text{min}}{1,075 \text{ m}^3/\text{kg}} = 5,72 \text{ kg aire seco}/\text{min} \\ &= 342,1 \text{ kg aire seco}/\text{h} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{W}_{ae} &= 342,2 \text{ kg aire seco}/\text{h} \cdot 0,012 \text{ kg agua}/\text{kg aire seco} \\ &= 4,1 \text{ kg agua}/\text{h} \end{aligned}$$

La interacción entre el aire precalentado y los granos húmedos que acontece en el interior de la secadora provoca la transferencia de la humedad retenida en el cereal hacia el aire que atraviesa dicha masa, al mismo tiempo en que los granos ganan el calor cedido por el caudal de aire que ingresa a mayor temperatura de la que sale al exterior. La masa de agua contenida por el aire a la salida de la secadora es:

$$\dot{W}_{as} = \dot{W}_{evap} + \dot{W}_{ae} = 8,1 \text{ kg agua}/\text{h} + 4,1 \text{ kg agua}/\text{h} = 12,2 \text{ kg agua}/\text{h}$$

Conocido el caudal de aire seco que ha ingresado al proceso y habiendo calculado la cantidad de agua que contendrá a la salida del equipo, podemos determinar el contenido de humedad del mismo en ese punto:

$$Y_s = \frac{12,2 \text{ kg agua}/\text{h}}{342,2 \text{ kg aire seco}/\text{h}} = 0,035 \text{ kg agua}/\text{kg aire seco}$$

Lo que finalmente, utilizando la carta psicrométrica para temperaturas normales (figura 2) y adoptando una temperatura del aire usado de  $T_s=40^\circ\text{C}$ , obtenemos que el mismo abandonará el equipo con la siguiente humedad relativa y volumen específico:

$$H_{Rs} = 74\% \quad V_s = 0,937 \text{ m}^3/\text{kg aire seco}$$

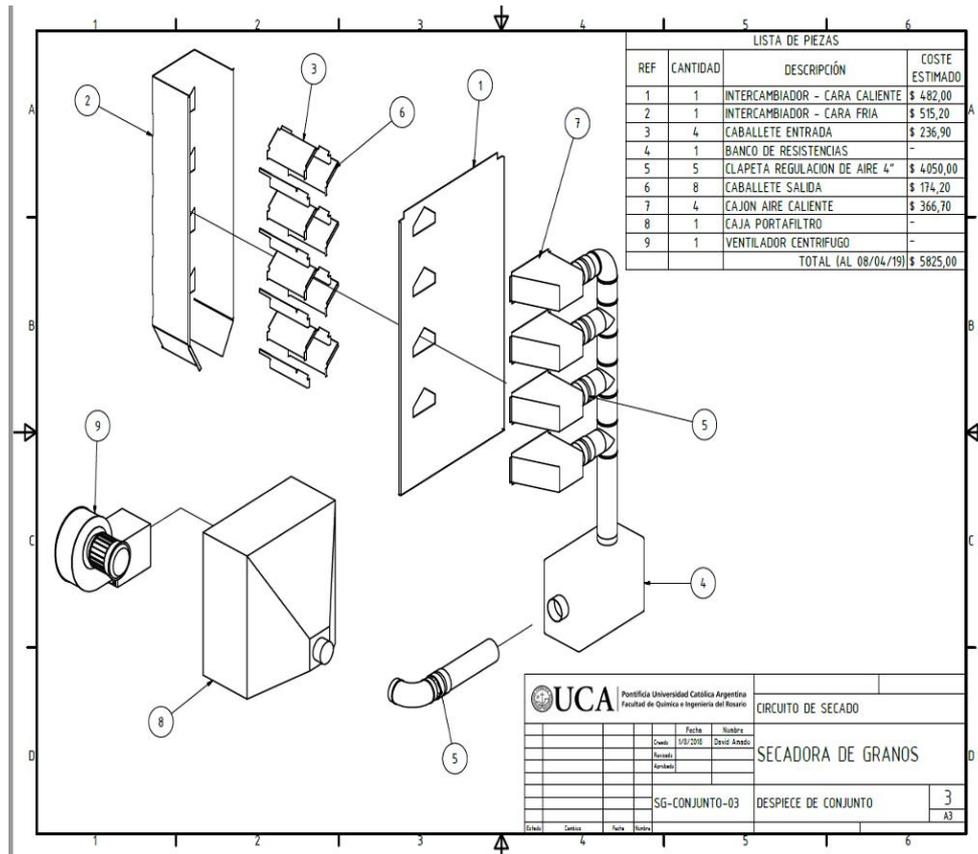


Figura 3: planos de referencia para fabricación

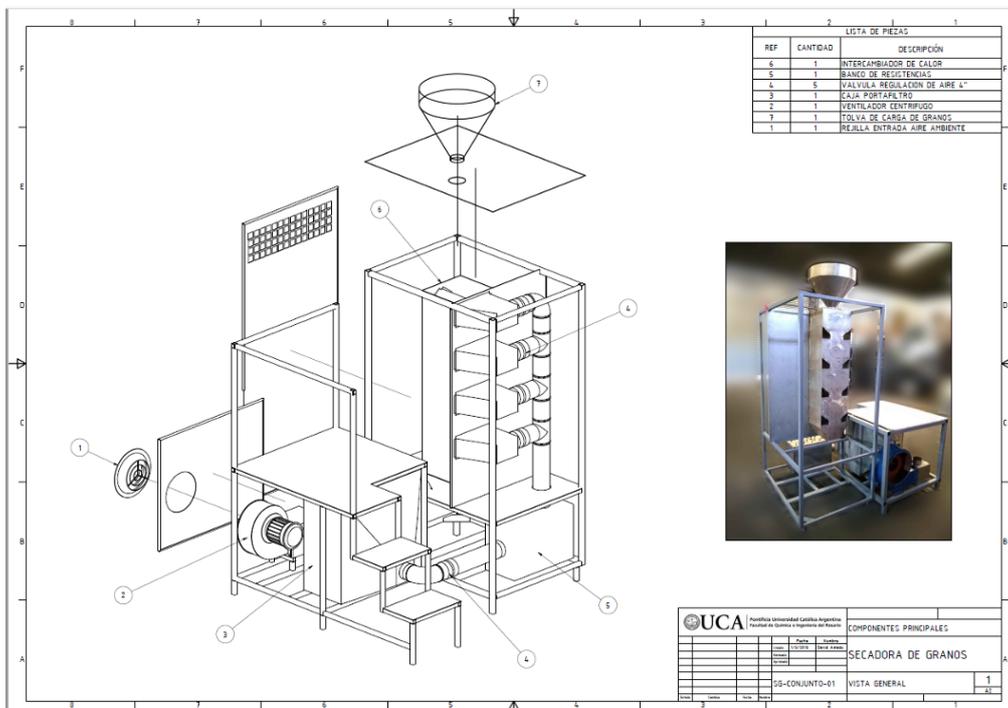


Figura 4: planos de referencia para fabricación II

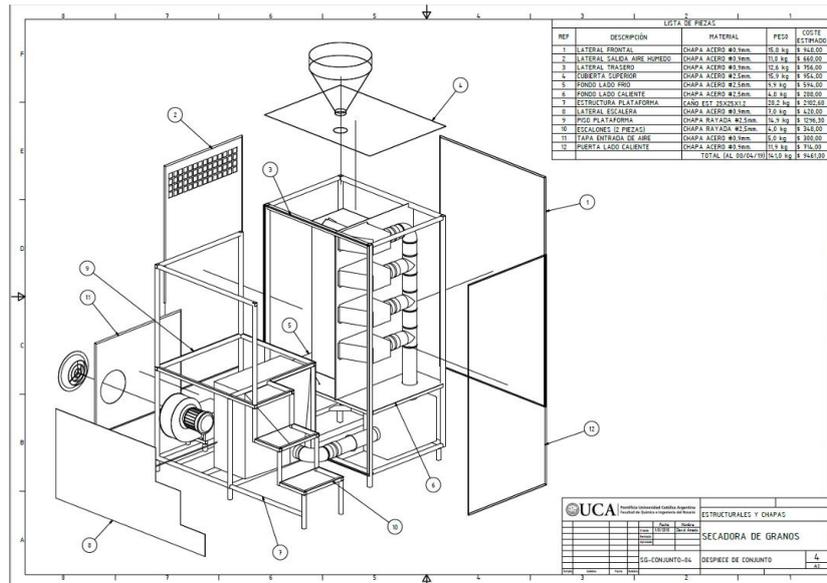


Figura 5: planos de referencia para fabricación III



Figura 6: Registros fotográficos del equipo

**5. Variables de control**

Cantidad de aire - Caudal

Temperatura aire caliente – (Resistencias de calentamiento)

Temperatura del lecho de granos

Tiempo de residencia – (Velocidad de circulación del grano en el lecho)

Humedad de entrada de granos

Humedad de salida de granos

Flujo en columna para relacionar con tiempo de residencia.

Humedad de entrada / salida del grano en función de parámetros de calidad específicos para cada tipo de grano, (Soja, Maiz, Trigo, etc).

Consumo de energía utilizada para calentamiento de aire seco.

## 6. Modelado, simulación y control del proceso de secado de granos:

El control de procesos de secado de granos El problema de control de procesos de secado de granos es de gran importancia en la optimización del consumo energético de los mismos y existe una gran cantidad de trabajos dedicados al estudio del mismo. Khatchatourian, Vielmo & Bortolaia<sup>1</sup> desarrollaron un modelo matemático, algoritmos y un programa en computadora para simular el funcionamiento de secadores de granos de flujo cruzado. Describen los procesos de transferencia de masa y de calor mediante un sistema de cuatro ecuaciones diferenciales parciales no lineales; que resuelven a través del método de MacCormack con tiempo fraccionado. Utilizaron el método de Neumann para determinar convergencia. Computarizaron las variables de proceso, incluidas en estas ecuaciones, mediante el uso de ecuaciones auxiliares semi-empíricas obtenidas a partir de datos experimentales de secado de grano en capa delgada. El equipo que desarrollaron para obtener estos datos les permitió variar los valores iniciales de humedad, temperatura y velocidad del aire. Realizaron simulaciones utilizando varios programas de control para determinar el impacto en el consumo de energía y el funcionamiento del secador de flujo cruzado al recircular aire gastado procedente de varias etapas del secador. Utilizaron un proceso iterativo para determinar las condiciones iniciales a la entrada de cada sección del secador. Utilizaron simulaciones computarizadas para evaluar la distribución no uniforme de la temperatura y del contenido de humedad en los secadores, la duración del proceso de secado y la eficiencia energética para cada geometría y programa de control.

A. G. Barbosa de Lima y otros<sup>2</sup> se enfocan en el secado de sólidos húmedos en secadores de flujo cruzado (sistema de secado continuo) con particular referencia a los granos. Presentan, con detalles, tópicos relacionados al grano, principios del secado, tipos y selección de secadores, y modelos de secado. Presentan y discuten un modelo matemático de un secador de flujo cruzado, considerando la influencia de la porosidad del lecho y términos temporarios. Resuelven numéricamente las ecuaciones de conservación gobernantes, usando el método de los volúmenes finitos. Para analizar la influencia de los principales parámetros de secado en la calidad del producto al final del proceso, presentan resultados de humedad promedio y temperatura del aire y temperatura y contenido de humedad del sólido a lo largo del proceso, que analizan y comparan con datos experimentales.

Según Marinos-Kouris y otros<sup>3</sup> el uso de computadoras para realizar simulaciones de procesos en ingeniería química ha dirigido el desarrollo de herramientas de software que realizan los cálculos más tediosos en el campo de análisis de procesos, modelos matemáticos y diseño. En el caso de secaderos, estos aspectos de programación matemática pueden ser tratados de forma sencilla. Presentan y analizan modelos matemáticos de todos los modelos de secaderos convectivos más usados. Discuten ampliamente las propiedades termofísicas y de transporte de materiales y del aire involucrado en el desarrollo de los modelos matemáticos. Esbozan y discuten la simulación de los procesos de secado convectivo facilitado por la tecnología de las computadoras modernas. Describen y realizan diseños de secaderos industriales convectivos a través de las herramientas de simulación desarrolladas. Introdujeron técnicas de diseño que permiten obtener información de resultados de diseño de parámetros de proceso y de variables de varios niveles, para integrarlas en curvas de diseño que arrojan valores de estructura del secadero y condiciones de operación óptimas, relacionadas con el costo.

Torrez N. y otros<sup>4</sup> estudiaron el secado de granos en secaderos de lecho móvil y flujo cruzado, teórica y experimentalmente. Analizaron dos configuraciones diferentes de secaderos, un secadero con distribución de aire central y otro con múltiples ingresos de aire. La información experimental la obtuvieron en secaderos a escala piloto. Desarrollaron un modelo matemático para simular el proceso. Utilizaron el concepto de velocidad de secado relativa para contabilizar áreas que obstaculicen el secado. Para contabilizar las incertidumbres del área de contacto y de los coeficientes de transferencia encontrados en la literatura, utilizaron un factor ajustable, específico para los secaderos. Consideran que encontraron concordancia bastante buena entre los resultados experimentales y las simulaciones. Las simulaciones mostraron que la distancia entre el ingreso del aire y los dispositivos de salida, la relación entre los flujos de aire y de sólido, y la relación entre la altura del secadero y su sección transversal tienen mucha influencia en el proceso. Según ellos, el modelo matemático puede ser una herramienta útil para explorar el proceso y optimizar este tipo de secaderos.

L. Vázquez-Chávez y otro<sup>5</sup>, secaron, en un secador de lecho fluidizado, dos variedades de trigo a diferentes temperaturas y analizaron la calidad final del trigo en cada caso. El secado es un proceso que disminuye la humedad de los granos y contribuye a conservarlos. No obstante, cuando el secado se lleva a cabo sin control adecuado de la temperatura, la calidad del trigo puede perderse la mayoría de las veces, sin alteración visual del grano. Para esta investigación utilizaron un equipo secador de lecho fluidizado a nivel de planta piloto, y trabajaron con dos variedades comerciales de trigo, con diferentes contenidos de humedad inicial y diversos tiempos y temperaturas de secado.

Los trabajos pioneros de Pratt, Rumsey y Palazoglu<sup>6</sup>, en este sentido nos sirven como guía para desarrollar un modelo de proceso representativo del secado de granos, ya sea para estudiar su dinámica como para diseñar el sistema de control. El modelo propuesto por estos autores, además de resultar adecuado al proyecto de planta piloto de UCA, resulta de una mayor utilidad para la simulación de la dinámica y el control del secado de granos, por razones de naturaleza computacional.

Una vez que han quedado definidas las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales (PDEs) que gobiernan el proceso, este autor recurre a un método computacional para resolver dicho sistema y poder además desarrollar un simulador dinámico del proceso controlado. Así, recurre al denominado el Método de las Líneas (MOL, METHOD OF LINES), el cual se basa en aproximar las PDEs por un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias, (EDOs). Nuestra línea de trabajo profundizará, la resolución del modelo mediante el método de las líneas, pero aplicaremos técnicas numéricas novedosas de resolución del sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias, que han demostrado, estos últimos años, tener una gran eficiencia para la resolución de problemas en esta área<sup>8</sup>.

La herramienta básica de todos los métodos tradicionales de integración de EDOs es la discretización de la variable temporal, si bien esta discretización puede ser constante o variable, en cualquiera de los casos, el modelo de simulación aproximado que se obtiene corresponde a la categoría de los sistemas de tiempo discreto. En los últimos años, sin embargo, se han desarrollado diferentes métodos que en lugar de obtener un modelo de simulación de tiempo discreto, obtienen un modelo de eventos discretos y una de las formas de arribar a estas clases de sistemas es reemplazar la discretización temporal por la discretización o cuantificación de las variables de estado del sistema. Se define así, una nueva categoría de sistemas denominada Quantized State Systems (QSS) que pueden ser exactamente simulados por un sistema de eventos discretos bajo el formalismo DEVS<sup>7,8</sup>.

El formalismo DEVS permite representar todos los sistemas cuyo comportamiento entrada / salida pueda describirse mediante una secuencia de eventos. Dentro de este formalismo se pueden construir modelos jerárquicos de una manera simple. Un modelo DEVS está compuesto por sub-modelos atómicos que pueden ser combinados en modelos acoplados, dado que los sistemas complejos generalmente se piensan como el acoplamiento de sistemas más simples. A través del acoplamiento, los eventos de salida de unos sub-sistemas se convierten en eventos de entrada de otros subsistemas. La teoría de DEVS garantiza que el modelo resultante de acoplar varios modelos DEVS es equivalente a un nuevo modelo DEVS. En cuanto a la implementación de los métodos de integración QSS podemos decir que una forma muy sencilla y eficiente es la que podemos obtener mediante el formalismo DEVS<sup>9</sup>. Específicamente con lo que denominamos un motor de simulación DEVS podemos implementar estos métodos de integración. Ahora bien, la implementación de los métodos QSS basados en el formalismo DEVS obligan a dar una descripción de bloques del modelo, sin embargo existen lenguajes de modelado de alto nivel que permiten variados tipos de representaciones y que son utilizados por gran parte de la comunidad de modelado y simulación. Ya en la década del 70 se comenzaron a desarrollar lenguajes de modelado específicos que permiten describir el modelo a simular de una manera estructurada e independiente del motor de simulación utilizado. Producto de este esfuerzo, en las últimas décadas se desarrolló un estándar llamado MODELICA<sup>10</sup> que se fue adoptando ampliamente por la comunidad de modelado y simulación.

MODELICA, es un lenguaje de modelado de alto nivel orientado a objetos que permite describir sistemas complejos y heterogéneos de gran escala permitiendo además reutilizar y componer modelos de manera sencilla. Los modelos en este lenguaje son definidos por ecuaciones diferenciales, algebraicas y discretas. Existen además, numerosas herramientas de software que permiten describir estos modelos. Existen también compiladores comerciales y libres que permiten convertir modelos en MODELICA a programas ejecutables.

Si bien, varias de las herramientas de modelado y simulación, como las presentadas anteriormente, están basadas en el mismo lenguaje de programación, C++ o Java, la mayoría no comparte el lenguaje de modelado, teniendo cada una su forma particular de describir un modelo, o componentes del mismo. Esto hace que no sean compatibles unas con otras o no puedan interactuar entre ellas. Además, un especialista que desea modelar y/o simular un sistema con alguna herramienta de modelado y simulación en particular, necesita conocer las características y particularidades del lenguaje de modelado de la herramienta. Por tal motivo, en este proyecto nos propusimos trabajar con la descripción de modelos DEVS abstractos, independiente de cualquier plataforma o implementación, basado en expresiones lógicas y matemáticas. Los modelos que estamos construyendo, utilizando la metodología de modelado CML-DEVS<sup>11</sup>, luego pueden ser traducidos (compilados) en forma automática al lenguaje de modelado de diferentes herramientas de modelado y simulación. CML-DEVS (por sus siglas en inglés: Conceptual Modeling Language for DEVS) es un lenguaje formal para la descripción abstracta de modelos DEVS, en termino de expresiones lógicas y matemáticas sin involucrar conceptos o nociones de programación. De este modo los ingenieros o especialistas pueden usar CML-DEVS, para escribir modelos DEVS, utilizando matemática cotidiana, tal como fuera propuesto por Zeigler a la hora de definir el formalismo.

## 7. Conclusiones Importantes

Los avances realizados hasta el momento nos han permitido la construcción del equipo y posible la modelización de variables con este piloto para utilizar en laboratorio y así luego de la operación en condiciones normales sacar conclusiones a medida que se modifiquen las variables. De la misma forma el análisis de las partículas de finos que se mueven a través de un fluido nos permitirá entender y mejorar la seguridad operativa al momento de separarlos del flujo de granos propiamente dicho.

Entonces con la construcción de la planta piloto tendremos la posibilidad de validar o ajustar las ecuaciones matemáticas para poder reproducir fielmente el comportamiento del grano dentro del equipo cuando se realiza el proceso de secado. Además, estamos trabajando sobre el modelado, simulación y control del proceso de secado de granos, utilizando el formalismo DEVS y recurriendo a herramientas informáticas que permiten implementar este formalismo de una manera eficiente. Para concluir entendemos si en su conjunto logramos el control de las variables del proceso esto nos llevara a la Optimización de energía en procesos de post cosecha de granos de origen agrícola.

## 8. Agradecimientos

Los autores quieren expresar su agradecimiento a la Pontificia Universidad Católica Argentina (UCA) y a la Facultad de Química e Ingeniería del Rosario por financiar este proyecto de investigación.

## Referencias bibliográficas:

- 1.- O.A. Khatchatourian, H.A. Vielmo, L.A. Bortolaia. Modelling and simulation of cross flow grain dryers. Bio systems engineering, Vol. 116 (2013), pp. 335-345 - Journal Homepage: [www.elsevier.com/locate/issn/15375110](http://www.elsevier.com/locate/issn/15375110)
- 2.- A. G. Barbosa de Lima, R. P. de Farias, S. R. Farias Neto, E. M. A. Pereira and J. V. da Silva. "Transport Phenomena and Drying of Solids and Particulate Materials" – Chapter: "Grain Drying Simulation: Principles, Modeling and Applications", p.p. 45-67 - Federal University of Campina Grande - Campina Grande - Brazil (2014) - ISSN 1869-8433 - ISSN 1869-8441 (electronic) - ISBN 978-3-319-04053-0 - ISBN 978-3-319-04054-7 (eBook).
- 3.- Marinos-Kouris, D., Maroulis, Z. B., & Kiranoudis, C. T. (1998). "Modeling, simulation and design of convective industrial dryers" Drying Technology, 16(6), 993-1026.
- 4.- Torrez, N., Gustafsson, M., Schreil, A., & Martínez, J. (1998). "Modeling and simulation of a crossflow moving bed grain dryers". Drying Technology, 16, 1999-2015.
- 5.- L. Vázquez-Chávez y M. Vizcarra-Mendoza. "Secado por lecho fluidizado del trigo y su calidad". Revista Mexicana de Ingeniería Química Vol. 7, No. 2 (2008) 131-137
- 6.- D. Platt, T. R. Rumsey and A. Palazoglu, "Dynamics and control of cross-flow grain dryers i. model development and testing". Drying Technology, 9:1, 27-60. 1991.
- 7.- F. Cellier and E. Kofman."Continuous System Simulation". Springer, New York, 2006.
- 8.- Francois Cellier."Continuous System Modeling". Springer, New York, 1991.
- 9.- Bernard Zeigler, Tag Gon Kim, y Herbert Praehofer. "Theory of Modeling and Simulation". Second edition. Academic Press, New York, 2000.
- 10.- Modelica Association "Language Specification – Modelica – A Unified Object – Oriented Language for Physical Systems Modeling". Linkoping, Sweden 2006.
- 11.- D. Hollman, M. Cristia, C. Frydman "Translating DEVS conceptual models into simulation models", Simulation Modelling Practice and Theory. Elsevier, volume 57, pages 100-117. 2015.