

**Casiello, Fransico ; Galaretto, Oscar ; Mazzolini, Cristian ;  
Farías, Ana M. ; Castagnini, Germán**

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

*Design and modeling of equipment for the study  
of the convective drying of grains of agricultural  
origin*

Energeia, Vol. 15, N° 15, 2018

Este documento está disponible en la Biblioteca Digital de la Universidad Católica Argentina, repositorio institucional desarrollado por la Biblioteca Central "San Benito Abad". Su objetivo es difundir y preservar la producción intelectual de la Institución.

La Biblioteca posee la autorización del autor para su divulgación en línea.

Cómo citar el documento:

Casiello, F. et al. Diseño y modelización de equipo para el estudio del secado convectivo de granos de origen agrícola [en línea]. Energeia, 15(15), 2018. Disponible en: <http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/greenstone/cgi-bin/library.cgi?a=d&c=Revistas&d=diseno-modelizacion-equipos-estudio> [Fecha de consulta: .....]

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

### ***Design and modeling of equipment for the study of the convective drying of grains of agricultural origin.***

**DIRECTOR:** Dr. Francisco Casiello, **CODIRECTOR:** Ing. Oscar Galaretto

**Grupo de Trabajo:**

Ing. Oscar Galaretto, Ing. Cristian Mazzolini, Ing. Ana M. Farias, Ing. Germán Castagnani

**PROYECTO:** *Diseño y modelización de equipo para el estudio del secado convectivo de granos de origen agrícola. AÑO: 2018*

**Resumen.** *En el presente trabajo se evaluará el diseño para 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. El interés por estudiar la problemática de esta actividad proviene de advertir que, en la literatura especializada se admite como normal un consumo de 1.500 a 2.000 kcal/kg de agua eliminada, mientras que el calor necesario para evaporar 1 kg de agua es del orden de 550 kcal. Aún admitiendo que la ruptura de enlaces a nivel molecular puede requerir mayor energía que la de una evaporación simple, la diferencia amerita intentar un abordaje sistemático del tema.*

*Particularmente en este caso se analizará el problema de la regulación de la temperatura de entrada de aire, en función de las temperaturas de bulbo seco y húmedo del aire ambiente. Estos valores, basados en una comprensión mas profunda de los fenómenos de transferencia involucrados debe 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.*

**Abstract.** *In this paper the design for construction of a pilot grain dryer will be evaluated in order to carry out studies and tests to identify possible energy savings during the process in the different ideal conditions in order to have a reference value at the moment 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 topics related to industrial activity in the agricultural and livestock core zone, where the Faculty. The interest in studying the problem of this activity comes from noticing that, in the specialized literature, a consumption of 1,500 to 2,000 kcal / kg of water eliminated is accepted as normal, while the heat necessary to evaporate 1 kg of water is of the order of 550 kcal. Even admitting that the breaking of bonds at the molecular level may require more energy than that of a simple evaporation, the difference deserves to attempt a systematic approach to the subject.*

*Particularly in this case the problem of the regulation of the air inlet temperature will be analyzed, depending on the dry and humid bulb temperatures of the ambient air. 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.*

**Objetivo general**

- ✓ Diseñar y Modelizar una secadora de granos.

**Objetivos Específicos**

- ✓ Construir equipo de secado piloto.
- ✓ Puesta en marcha y operación de secadora
- ✓ Aplicar algoritmos de control básicos.

**1.- ANTECEDENTES**

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 Marinós-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.

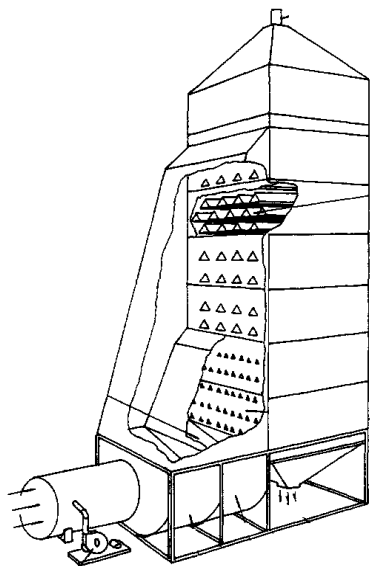
L. Vázquez-Chávez y otro<sup>5</sup>, secaron, en un secador de lecho fluidizado, dos variedades de trigo a diferentes temperaturas y analizaron la calidad final del trigo en cada caso. El secado es un proceso que disminuye la humedad de los granos y contribuye a conservarlos. No obstante, cuando el 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.

Generalmente el secado del grano suele convertirse en un cuello de botella para la industria ya que, además de ser costoso, es potencialmente peligroso para la calidad del grano. Es por ello que las instalaciones de secado representan inversiones importantes. Del total de la energía utilizada en el proceso de producción de granos, el secado insume alrededor del 50%. Tomando en cuenta estos dos factores, calidad y consumo de energía, se puede apreciar claramente la importancia que adquiere este proceso. Además, el creciente impacto económico y ambiental derivado del uso de combustibles fósiles hacen del secado de granos una práctica de gran importancia técnico-económica, por lo que la industria ha intensificado la búsqueda de soluciones para mejorar el rendimiento de las secadoras de granos.

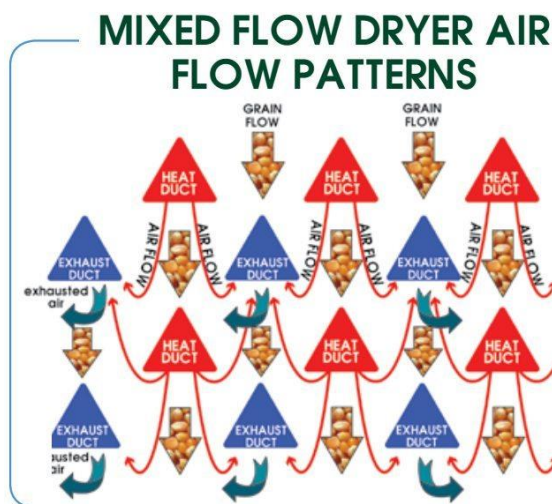
El interés de este proyecto, sin embargo, se centra en la determinación del consumo energético durante el proceso de poscosecha y el diseño de acciones tendientes a la minimización de este consumo. A pesar de que el secado es uno de los procesos más empleados a nivel industrial, todavía se desconocen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

## 2.- FABRICACION DEL EQUIPO

El equipo que construiremos será 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.



Conjunto armado de referencia



Detalle del flujo de granos sobre caballetes

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

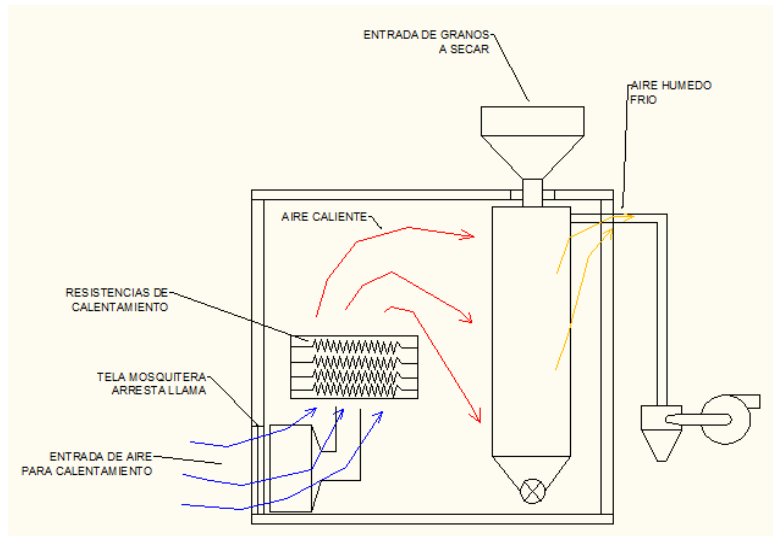


Diagrama de flujo de aire dentro del equipo

### 2.1.- Detalles de la construcción

Para la implementación de la construcción se reutilizaran equipos y partes donadas a la Facultad por empresas de la zona. Estos equipos serán adaptados a las necesidades específicas del diseño de la secadora por alumnos que participan del proyecto.

#### Partes componentes básicas

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

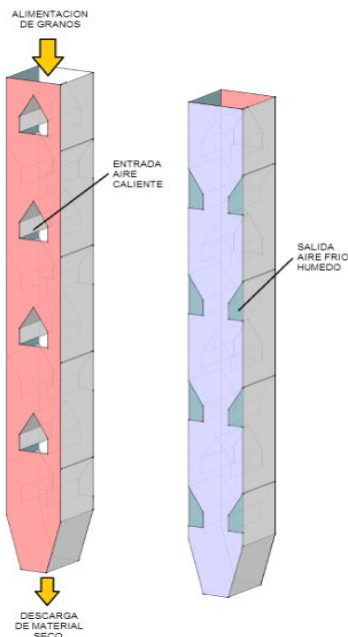
Una secadora convencional de este tipo, correctamente construida, utilizada y mantenida tiene un consumo energético de poco más de 1000 kcal/kg de agua evaporada. Esta cantidad se compone aproximadamente de la siguiente manera:

Calor necesario para la evaporación de 1 kg de agua	600 kcal
Pérdida por el calor sensible que se va en el aire usado	300 kcal
Perdidas de calor por conducción, radiación y convección hacia el exterior	30 kcal
Pérdida por el calor transportado por el grano	80 kcal
<b>Total</b>	<b>1010 kcal</b>

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.



Flujo del grano en lecho de secado

En etapas posteriores a este trabajo se avanzara con el desarrollo de un sistema de automatización de la operación del equipo.

Durante esta etapa de diseño 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.

## 2.2.- 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

## 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.

Durante el transcurso de este año se profundizará 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 impedida; 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.

#### **4.- INTERPRETACION DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES**

Los avances realizados hasta el momento nos permiten pensar que es posible la modelización y construcción de un equipo 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.

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.

#### **5.- 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.

#### **6.- Referencias bibliográficas:**

1. O.A. Khatchaturian, 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. Dios, Carlos Alberto de, Secado de granos y secadoras, 2a ed., Ed. Hemisferio Sur, Buenos Aires, 2000
7. Catalogo ZANIN – MiniDry (Detalle técnico de maquinarias disponibles) ZANIN Flli s.r.l.