

Deshidratación de un alimento en cinta transportadora, programa para diseñar el proceso y evaluarlo económicamente

Montesano, Juan*, Dipietro, Angel.

Universidad Católica Argentina, Facultad de Ciencias Fisicomatemáticas e Ingeniería. Avenida Alicia Moreau de Justo 1500, CP 1107, C.A.B.A., Argentina,

jmontesano@speedy.com.ar

RESUMEN.

La deshidratación es un método de estabilización de alimentos que se basa en la reducción de la actividad del agua (aw) para ralentizar los procesos de deterioro a los que se ve sometidos los mismos

En este trabajo se aplica el método de **secado por arrastre**. [3]

En el secado por arrastre la energía necesaria, es aportada normalmente por el agente de arrastre (aire seco y caliente normalmente) que cede su calor sensible a la vez que se carga de humedad, proveniente del alimento. Cuando el agente de secado aporta todo el calor necesario para la vaporización, se tiene un secadero adiabático. Esta condición tiene importancia en el diseño del equipo.

Para acelerar los cálculos en los que intervienen conceptos básicos de aire húmedo, cinéticas de secado, termodinámica y transferencia de calor; se utiliza un programa con el software matemático, [4] que permite entrando con la cantidad de alimento a procesar, temperatura, humedad y las propiedades del aire húmedo disponible, diseñar y determinar los requerimientos energéticos del equipo de secado.

El trabajo se completa con un estudio económico en el que se calcula los costos de los servicios (electricidad y vapor de calentamiento) costos de equipamiento (cinta, intercambiador y ventilador) costo de operación anual y costo total anual teniendo en cuenta la depreciación de los equipos.

Palabras Claves: Secado. Cinta transportadora. Alimento. Software

ÁREA TEMÁTICA.

E-Innovación y Gestión de Productos,

1. INTRODUCCIÓN.

1.1. OBJETIVO

El objetivo del trabajo es la simulación por medio de un software matemático amigable de un proceso de secado sobre cinta transportadora de un alimento, con aire debidamente acondicionado.

La idea, es abarcar una simulación completa, es decir con la base de principios de termodinámica y transferencia de calor el cálculo de la cantidad de energía necesaria para preparar el aire de secado y por lo tanto especificar el área de transferencia en los equipos. Con los balances de masa determinar el caudal de aire necesario para una producción determinada de alimento enfiado, y las dimensiones del lecho de alimento sobre la cinta transportadora.

Con las pérdidas de carga del aire en el lecho y el cámara de enfriamiento el cálculo de energía eléctrica requerida por el ventilador y la cinta.

Se completa el trabajo con fórmulas que permiten determinar los costos anuales totales donde se incluyen los de equipamiento y los operativos.

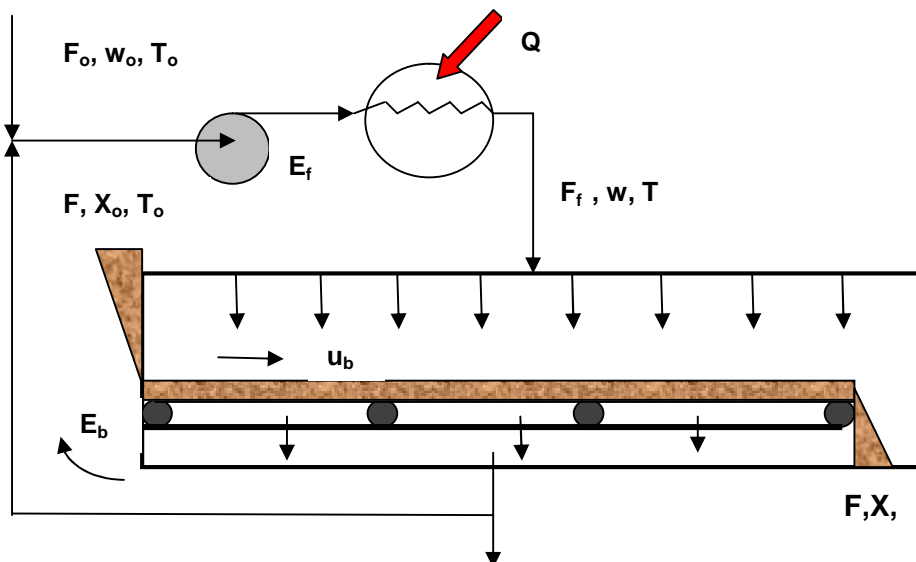


Figura 1. Esquema del proceso de deshidratado con aire por arrastre, sobre cinta transportadora

1.2. Descripción del proceso

En la Figura 1 se muestra el *flowsheet* del proceso estudiado.

Ingresa al secadero, F (kg/s) de alimento, en base seca, a una temperatura de T_o ($^{\circ}\text{C}$) con una humedad X_o (kg de agua/ kg de alimento seco); formando un lecho sobre una cinta transportadora. La temperatura del alimento a la salida de la cámara de enfriamiento es de T ($^{\circ}\text{C}$) y una humedad X (kg de agua/ kg de alimento seco). La cinta se mueve a una velocidad de u_b (m/s). La energía necesaria para mover la cinta con el alimento, es E_b (kW).

El caudal de aire húmedo para el secado es F_f (kg aire seco/s) y su temperatura T ($^{\circ}\text{C}$) y con una humedad absoluta w . El aire atraviesa el alimento, que se encuentra sobre la cinta transportadora. La energía gastada por el ventilador para impulsar el aire es E_f (kW).

El aire se calienta en un calentador, la cantidad de calor entregada al aire es Q (kW).

Parte del aire del proceso, es reciclado y mezclado con F_o (kg de aire seco/s) aire atmosférico a una temperatura T_o ($^{\circ}\text{C}$) y una humedad específica w_o .

2. PROCEDIMIENTO MATEMÁTICO.

Con la ecuación (1) se calcula la presión de vapor de saturación. Con la humedad relativa y la presión de vapor de saturación con la ecuación (2) se calcula la humedad absoluta [1]. Con estos valores se calcula la cinética de secado, específicamente con la ecuación (5) el tiempo de secado. [3]

Las ecuaciones (6) contienen los balances del contenido de humedad en el secado. Una se refiere al alimento y la otra al aire. Con lo cual es posible calcular el caudal de aire seco, necesario para el secado. [2]

La ecuación (7) es el valor de la entalpía del aire húmedo [2]. Las ecuaciones (7), (8) y (9) son de la energía puesta en juego para el secado. Las ecuaciones (8) para el aire, la (9) para el alimento y la (10) referida al agua de evaporación. La (11) suma toda la energía puesta en juego. La ecuación (12) es usada para el dimensionamiento del calentador [1-2].

Las ecuaciones de la (13) a la (17) permite el diseño del lecho de secado en la cinta transportadora. De la (18) a la (20) se refieren a la pérdida de carga del aire que se recicla y por lo tanto el cálculo de la energía eléctrica, necesaria para impulsar el ventilador. [6]

La ecuación (21) estima la energía eléctrica necesaria para mover la cinta transportadora. Y la (22) la energía total requerida.

Desde la ecuación (23) a (25) se refieren al estudio económico del proceso. La ecuación (23) costos de equipamiento. (24) costos operativos y (25) los costos totales anuales con una tasa de interés e. [5]

2.1. Fórmulas matemáticas utilizadas

Presión de vapor de saturación (Antoine)

$$pv = \exp \left[11,9 - \frac{3990}{234 + T} \right] \quad (1)$$

Humedad absoluta del aire húmedo

$$w = 0,622 \cdot \frac{pv \cdot \varphi}{1 - pv \cdot \varphi} \quad (2)$$

Contenido de humedad en el alimento de equilibrio

$$Xe = 0,000735 \cdot \exp \left[\frac{1750}{273 + T} \right] \left[\frac{\varphi}{(1 - \varphi)} \right]^{0,4} \quad (3)$$

Constante de la cinética de secado

$$t_c = 0,5 \cdot d^{1,40} \cdot \mu^{-1,65} \cdot T^{-0,25} \cdot w^{0,12} \quad (4)$$

Tiempo de secado

$$t = t_c \cdot \ln \left(\frac{X - X_e}{X_o - X_e} \right) \quad (5)$$

La cantidad perdida de agua por el alimento es igual a la ganada por el aire. Caudal de aire necesario

$$\begin{aligned} W &= F \cdot (X_o - X) \\ W &= F_o \cdot (w - w_o) \\ F_a &= \frac{W}{(w - w_o)} \end{aligned} \quad (6)$$

La entalpía del aire húmedo

$$h = C_{pa}.T + w_o(C_{pv}.T + h_o) \quad (7)$$

La variación de entalpía del aire húmedo y la cantidad de calor que hay que entregarle al aire

$$\begin{aligned} \Delta h &= (C_{pa} + w_o C_{pv})(T - T_o) \\ Q_a &= F_a.[C_{pa} + w_o C_{pv}](T - T_o) \end{aligned} \quad (8)$$

Cantidad de calor que recibe el alimento

$$Q_s = F.[C_{ps} + X_o C_{pL}](T - T_o) \quad (9)$$

Cantidad de calor para evaporar el agua

$$Q_{we} = F.(X_o - X)[\Delta h - (C_{pL} - C_{pv})T] \quad (10)$$

Cantidad total de calor

$$Q = Q_a + Q_s + Q_{we} \quad (11)$$

Fórmula de transferencia de calor. Flujo de calor del agua que calienta el aire

$$Q = A_s U (T_s - T) \quad (12)$$

Masa de alimento

$$M = t.F (1 + X_o) \quad (13)$$

Volumen de alimento sobre la cinta transportadora

$$H = \frac{M}{(1 - \varepsilon)\rho_s} \quad (14)$$

Largo de la cinta transportadora

$$L = \frac{H}{Z_o.D} \quad (15)$$

Área del alimento sobre la cinta

$$A_b = L.D \quad (16)$$

Velocidad de la cinta

$$u_b = \frac{L}{t} \quad (17)$$

Pérdida de carga del aire que pasa a través del lecho

$$\Delta P = f.Z_o.u^2 \quad (18)$$

Caudal de aire reciclado

$$F_f = \rho_a.u.D.L \quad (19)$$

Energía para reciclar el aire

$$E_f = \frac{\Delta P \cdot F_f}{\rho_a} \quad (20)$$

Energía para mover el lecho

$$E_b = e \cdot L \cdot (1 + X_o) \cdot F \quad (21)$$

Energía total

$$E = E_f + E_b \quad (22)$$

Costo de equipamiento

$$C_{eq} = C_b \cdot A^{nb} + C_{int} \cdot A^{nint} + C_{Vent} \cdot E_f^{nVent} \quad (23)$$

Costo de operación anual

$$C_{op} = (C_s Q + C_e E) t_a \quad (24)$$

Costo total y tasa

$$C_{Total} = e \cdot C_{eq} + C_{op} \quad (25)$$

$$e = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

2.2. Datos del proceso

Densidad

$$\rho_a = 1,00 \text{ kg/m}^3 \text{ Aire}$$

$$\rho_s = 1750 \text{ kg/m}^3 \text{ Frutillas}$$

$$\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3 \text{ Agua}$$

Calores específicos

$$C_{pw} = 4,18 \text{ kJ/kgK} \text{ Agua}$$

$$C_{pv} = 1,90 \text{ kJ/kgK} \text{ Vapor de agua}$$

$$C_{pa} = 1,00 \text{ kJ/kgK} \text{ Aire}$$

$$C_{ps} = 2,00 \text{ kJ/kgK} \text{ Alimento}$$

Calores latentes de evaporación

$$\Delta H_w = 2500 \text{ kJ/kg} \text{ Agua}$$

Coefficientes totales de transferencia

$$U_e = 0,1 \text{ kW/m}^2 \text{K} \text{ Coeficiente de transferencia de calor total para el aire}$$

$$\varepsilon = 0,40 \text{ Relación de espacios vacíos}$$

2.2.1. Especificaciones del proceso

$$F = 0,10 \text{ ton/h} \text{ Caudal de alimento a procesar}$$

$$X_o = 10 \text{ kg/kas} \text{ Cantidad de humedad inicial del alimento}$$

$X = 0,10 \text{ kg/kgas}$ Cantidad de humedad final del alimento

$T_o = 25^\circ\text{C}$ Temperatura ambiente

$d = 0,01\text{m}$ Tamaño característico del material a secar

$\phi = 22,6\%$ Humedad relativa

$w_o = 0,01\text{kg/kgas}$ Humedad absoluta del ambiente

$P = 1\text{ata}$ Presión de trabajo

$T = 65^\circ\text{C}$ Temperatura del aire de secado

$T_s = 160^\circ\text{C}$ Temperatura del vapor de calentamiento del aire

$u = 1,5\text{m/s}$ Velocidad del aire

$D = 2\text{m}$ Ancho del lecho

$Z_o = 0,20\text{m}$ Alto del lecho

2.2.2. Costos operativos [7]

$C_e = 0,10 \text{ USD/kW}$ Costo de la electricidad

$C_s = 0.05 \text{ USD/kW}$ Costo calentamiento vapor

2.2.3. Costos de equipamiento

$C_b = 25,0 \text{ k USD/m}^2$ Costo lecho

$C_r = 2,00 \text{ k USD/m}^2$ Costo intercambiador

$C_v = 1,00 \text{ k USD/m}^2$ Costo ventilador

$n_b = 0,95$

$n_i = 0,65$

$n_v = 0,75$

$t_a = 4000\text{h/año}$ tiempo de operación anual

$i = 8\%$ interés

$t_f = 5\text{años}$ tiempo de vida

2.3. Programa del software

Se copia la hoja del software con:

Los datos (los puntos son equivalentes a comas)

2.3.1. Datos proceso

$F := 100$ $X_o := 10$ $X := 0.1$ $C_{ps} := 2.00$ $\rho_s := 1750$ $d := 0.01$

$T := 65$ $\phi := 0.226$ $w_o := 0.01$ $P := 1$ $C_{pa} := 1.00$ $\rho_a := 1$

$C_{pw} := 4.18$ $C_{pv} := 1.90$ $\rho_w := 1000$ $u := 1.5$ $T_s := 160$ $U := 0.1$

$D := 2$ $Z_o := 0.2$ $\varepsilon := 0.4$ $T_o := 25$

2.3.2. Datos económicos

$C_e := 0.1$ $C_s := 0.05$ $C_b := 25.0$ $C_i := 2.00$ $C_v := 1.00$

$n_b := 0.95$ $n_i := 0.65$ $n_v := 0.75$ $t_a := 4000$ $i := 0.08$

$C_e := 43$ $C_s := 229$ $t_f := 5$

2.3.3. El programa de cálculo proceso

VI Congreso de Ingeniería Industrial COINI 2013
7 y 8 de noviembre de 2013 - Centro Tecnológico de Desarrollo Regional
Facultad Regional San Rafael - Universidad Tecnológica Nacional
Los Reyunos, San Rafael, Mendoza, Argentina

Seco(F, To, T, Ts, Xo, X, Cps, Cpa, U, D, Zo, ε, ρs, d, φ, wo) :=

$$\begin{aligned}
 pv &\leftarrow \exp\left(11.9 - \frac{3990}{234 + T}\right) \\
 w &\leftarrow 0.622 \cdot \frac{\phi \cdot pv}{1 - \phi \cdot pv} \\
 W &\leftarrow \frac{F}{1000} \cdot (Xo - X) \\
 Fa &\leftarrow \frac{W}{(w - wo)} \\
 h &\leftarrow 1 \cdot T + wo \cdot (1.9T + 2500) \\
 \Delta h &\leftarrow (1 + wo \cdot 1.9) \cdot (T - To) \\
 Qa &\leftarrow \frac{Fa}{3600} \cdot (1 + wo \cdot 1.9) \cdot (T - To) \\
 Qs &\leftarrow \frac{F}{3600 \cdot 1000} \cdot (Cps + Xo \cdot 4.18) \cdot (T - To) \\
 Qwe &\leftarrow \frac{F}{3600 \cdot 1000} \cdot (Xo - X) \cdot [2500 - (4.18 - 1.9) \cdot (T)] \\
 Q &\leftarrow Qa + Qs + Qwe \\
 As &\leftarrow \frac{Q \cdot 1000}{U \cdot (Ts - T)} \\
 Xe &\leftarrow 0.000735 \exp\left(\frac{1750}{273 + T}\right) \cdot \left(\frac{\phi}{1 - \phi}\right)^{0.4} \\
 tc &\leftarrow 0.81 \\
 t &\leftarrow -tc \cdot \ln\left(\frac{X - Xe}{Xo - Xe}\right) \\
 M &\leftarrow t \cdot F \cdot (1 + Xo) \\
 H &\leftarrow \frac{M}{(1 - \varepsilon) \cdot \rho s} \\
 L &\leftarrow \frac{H}{Zo \cdot D} \\
 Ab &\leftarrow L \cdot D \\
 ub &\leftarrow \frac{L}{t} \\
 Eb &\leftarrow \frac{F}{1000} \cdot (1 + Xo) \cdot L \cdot 2.0 \\
 \Delta P &\leftarrow 0.2 \cdot Zo \cdot u^2 \\
 Ff &\leftarrow 1 \cdot u \cdot D \cdot L \cdot 3.6 \\
 Ef &\leftarrow \frac{\Delta P \cdot Ff \cdot 1000}{1 \cdot 3600} \\
 E &\leftarrow Eb + Ef \\
 \begin{pmatrix} w & W & Fa & Ff & Qa \\ Qs & Qwe & Q & t & H \\ L & M & ub & Ab & As \\ Eb & Ef & E & \Delta P & pv \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

2.3.4. Programa de cálculo económico

$$C_{eq} \leftarrow C_b \cdot A_b^{nb} + C_i \cdot A_s^{ni} + C_v \cdot E_f^{nv}$$

$$C_{op} \leftarrow (C_s \cdot Q + C_e \cdot E) \cdot t_a$$

$$e \leftarrow \frac{[i \cdot (1 + i)]^{t_f}}{(1 + i)^{t_f} - 1}$$

$$C_t \leftarrow e \cdot C_{eq} + C_{op}$$

$$\begin{pmatrix} C_{eq} \\ C_{op} \\ C_t \end{pmatrix}$$

3. RESULTADOS

Tabla1 Expresión de los resultados

| Proceso | | Económicos | |
|-----------------------|----------------------|--------------------|--------------|
| Concepto | Valor | Concepto | Valor |
| Flujo de aire entrada | 39,56 ton/h | Costo equipamiento | 623 kUSD |
| Flujo de reciclo | 141,8 ton/h | Costo operativo | 191 kUSD |
| Calor de vaporización | 0,6470 MW | Costo anual total | 513 kUSD/año |
| Calor del sólido | 0,0490 MW | | |
| Calor aire | 0,4480 MW | | |
| Gasto de elec. lecho | 28 kW | | |
| Gasto ventilador | 50 kW | | |
| Gasto total | 78 kW | | |
| Área de transferencia | 120,35m ² | | |
| Área del lecho | 26,25 m ² | | |
| Largo cinta transp. | 13,13m | | |
| Agua extraída | 0,990ton/h | | |
| Tiempo de secado | 5,0120 h | | |

4. CONCLUSIONES.

El trabajo consiste en el diseño de un proceso de secado de un alimento, en cinta transportadora. Para tal efecto se realiza un programa en un software matemático, que permite no solamente calcular parámetros fundamentales de producción, sino que abre la posibilidad de modificar los datos de entrada facultando el análisis, la síntesis y la optimización de un proceso de secado.

El cálculo de la potencia total consumida permite, en forma estimativa, realizar un estudio de costos de equipamiento y de operación.

A nivel empresa, facilita no tener que recurrir a prototipos físicos para realizar pruebas, con el consiguiente ahorro de costos, y acorta el tiempo de puesta del producto final en el mercado, aportando una importante ventaja competitiva.

Estos tipos de trabajos resultan interesantes también, desde el punto de vista didáctico. Aplicado en los últimos años de la Facultad, en la asignatura de Procesos Industriales, permite al estudiante integrar los conceptos básicos de Termodinámica, de Físicoquímica, de Transferencia de calor y Procesos generando, además, un amplio criterio ingenieril.

El simulador, en general, se convierte en un modelo computacional, que es una herramienta de fundamental importancia para la ciencia y la tecnología y por tanto, se hace necesario contar con recursos humanos altamente capacitados para enfrentar los desafíos del desarrollo tecnológico y científico nacional.

4. REFERENCIAS.

- [1] Cengel, Yunus A.; Boles, Michael A. (2006). *Termodinámica*. México. Quinta edición. Ed. Mc Graw Hill. México.
- [2] Cengel, Yunus A. (2007). *Transferencia de Calor y Masa*. México. Tercera edición. Ed. Mc Graw Hill México.
- [3] Singh, R. Paul; Heldman, Dennis R. (2010). *Introducción a la ingeniería de los alimentos*. España. Segunda edición. Ed. Acribia, S.A. Zaragoza.
- [4] Cutlip, M. Shacham M. (2008) *Resolución de Problemas en Ingeniería Química y Bioquímica con Polymath, Excel y Matlab*. Segunda edición. Ed. Prentice Hall. España
- [6] Peters M.; Timmerhaus K. *Diseño de Plantas y su Evaluación Económica para Ingenieros Químicos* (1980). Argentina. Primera edición. Ed. Géminis S.R.L Buenos Aires.
- [7] Levenspiel O. (1997) *Flujo de Fluidos- Intercambio de Calor*. España Primera edición. Ed. Reverté S.A. Barcelona.
- [8] Maroulis Z.; Saravacos, (2010) *Food Process Desing*. EE.UU. Primera edición. Ed. Marcel Becker Inc. New York.