

SIMPSET: Programa de simulación del proceso de secado de textiles delgados

Katiuska Franceschi*, Sergio Pérez, Donato Magarelli

Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo, Valencia, Estado Carabobo, Venezuela.

Resumen.-

En la actualidad es de gran utilidad el empleo de programas de simulación que permiten el estudio rápido y confiable de procesos, ante los cambios en las condiciones de operación, suministrando resultados para la toma de decisiones. En este trabajo se desarrolló el programa SIMPSET, para la simulación del proceso de secado de textiles delgados mediante un cilindro calentado por inducción eléctrica. En trabajo previo se realizó el modelaje del proceso mediante balances de masa y energía. Inicialmente se desarrolló el algoritmo de ecuaciones del modelaje del proceso, se plantearon en lenguaje Delphi para obtener el programa SIMPSET, que permite evaluar el comportamiento de la temperatura de la tela y del cilindro, así como la humedad de la tela ante cambios en las condiciones de operación y cambios en el diseño del equipo. Los resultados obtenidos a partir del programa se analizaron, encontrándose que estos concordaban con el comportamiento teórico esperado.

Palabras clave: Secado de textiles, Inducción eléctrica, Simulador de procesos.

SIMPSET: Program of simulation of the drying process of textile thin

Abstract.-

Actually is of great utility the use of simulation programs that allow a faster and reliable processes studies, in the face at perturbations of the operation conditions, and to have results for the making decisions. In this work a program was developed SIMPSET, for the simulation of the drying process of a thin textile using a cylinder heated by electric induction. In previous work was carried out the modelling of the process by means of the mass and energy balances. Initially was developed the algorithm from the equations of the modelling of the process, they thought about in language Delphi to obtain the program SIMPSET, to evaluate the behavior of the temperature of the textile and the cylinder, as well the humidity in the face of changes in the operation conditions and changes in the design of the equipment. The results from the program were analyzed, being that you/they agreed with the prospective theoretical behaviour.

Keywords: Drying of textile, Electric induction, Simulation of processes.

Recibido: 3 febrero 2010

Aceptado: 10 agosto 2010

1. INTRODUCCIÓN

El calentamiento en secadores tipo cilindro rotatorio usualmente se realiza empleando gas de combustión y vapor, los cuales tienen asociados costos operacionales importantes además de problemas de contaminación. En el proceso de secado de textiles, existen técnicas innovadoras que utilizan electricidad en su principio de secado, las cuales se caracterizan por un

*Autor para correspondencia

Correos-e: kfranceschi@uc.edu.ve (Katiuska Franceschi), sperez@uc.edu.ve, (Sergio Pérez), donato_magarelli@hotmail.com (Donato Magarelli)

menor consumo de energía [1]. Nuevas tecnologías, utilizando calentamiento por inducción electromagnética de cilindros son consideradas como alternativas ventajosas desde el punto de vista económico y de protección ambiental [2]. Otra tecnología de secado utilizando combinación de calentamiento por microonda y conducido por capa (microwave heating and spouted-bed drying, MWSB) de manzanas cortadas en cubo, un material poroso higroscópico, fue estudiado por Feng et. al [3], quienes desarrollaron un modelo matemático de transferencia de masa y calor del secado considerando la dependencia termodinámica de la humedad y la temperatura, el cual es validado con datos experimentales. Por su parte De Kuang [4] desarrolló un modelo matemático para describir el proceso de secado de papel por infrarrojo en una planta piloto, el cual estudia varios fenómenos (transferencia de masa de vapor y agua, transferencia de calor por conductividad, convectividad y radiactividad). El modelo matemático se valida utilizando resultados experimentales y puede predecir la humedad y temperatura del papel durante el secado.

En el presente trabajo, el secado de textiles empleando inducción electromagnética en el calentamiento de una superficie metálica cilíndrica se estudia como una nueva tecnología de secado. Para ello se emplearon tres inductores cada uno con un par de bobinas que generan aproximadamente 11.7 kW de energía. El calentamiento del cilindro por inducción electromagnética se basa en el efecto de Joule Thomson, al generarse un flujo de energía que se transmite al cilindro ocasionando un movimiento molecular lo que permite su calentamiento. Para el desarrollo de modelos matemáticos de diferentes alternativas de secado de materiales porosos, se dispone en la literatura de diversas ecuaciones matemáticas que pueden usarse para el modelado de operaciones de secado [5], [6], [7]. Franceschi et. al [8], realizó el modelaje del proceso de secado de textiles delgados empleando como tecnología de calentamiento inducción eléctrica. Basándose en el modelaje validado por Franceschi et. al [8], se desarrolla el programa de simulación SIMPSET que permite evaluar el proceso de

secado de textiles delgados a base de algodón en un cilindro rotatorio calentado por inducción electromagnética. Mediante el programa se puede estimar la temperatura y humedad a la salida de la zona de secado. De esta manera se dispone de este recurso para estudiar el proceso de secado, de una manera rápida y confiable. El programa permite evaluar variaciones de las condiciones de operación, tales como: velocidad de rotación del cilindro y potencia de inducción. Además, provee una confiable predicción de la temperatura en la superficie del cilindro durante el ciclo de calentamiento y enfriamiento, así como la temperatura y humedad del textil a la salida del proceso de secado. El simulador desarrollado es una herramienta útil para la evaluación del proceso al ofrecer la ventaja de poder realizar cambios en el diseño del equipo pudiendo facilitar el estudio futuro del secado ante las modificaciones que se puedan plantear en el sistema.

Descripción del proceso de secado. El proceso consiste en el paso la tela por un cilindro metálico rotatorio hueco en el cual su superficie es calentada por inducción eléctrica. Para el calentamiento se emplean tres inductores electromagnéticos cada uno de ellos está formado por dos bobinas. Los inductores disponen de una potencia máxima de 11.7 kW, que fue limitada a un 90% de su capacidad lo cual equivale a 10.5 kW. El material poroso mantenido en contacto al cilindro por medio de dos rodillos R1 y R2, siendo R2 un rodillo de posición fija mientras que R1 puede tener distintas posiciones lo cual genera diferentes superficies de contacto entre el material poroso y el cilindro. Dependiendo de la posición angular del rodillo R1 es posible contar con una superficie máxima y mínima de contacto [2]

En la Figura 1 se puede apreciar las diferentes zonas en el cilindro además del volumen de control en la superficie del cilindro considerando las distintas interacciones de calor.

2. METODOLOGÍA

Se dispone del modelo asociado a la convección, conducción, radiación y de inducción electromagnética de energía en la superficie metálica del

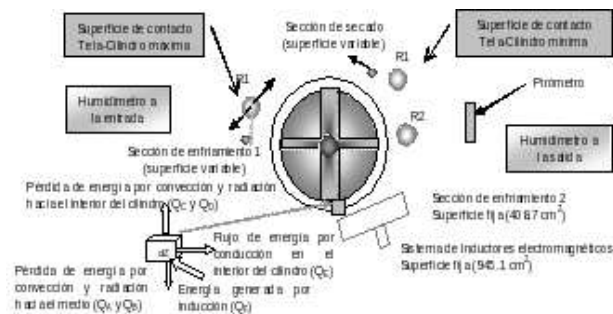


Figura 1: Representación de distintas superficies del cilindro rotatorio.

cilindro, además se tiene modelado el proceso de secado de diferentes textiles delgados en contacto con el cilindro rotatorio calentado por inducción electromagnética [8]. Basándose en el modelaje de Franceschi *et. al* [8], se prosiguió a establecer la ruta de cálculo más apropiada, codificando las ecuaciones establecidas para la obtención de la temperatura en la superficie del cilindro durante el ciclo de calentamiento y enfriamiento, así como la temperatura y humedad a la salida del proceso de secado. Es importante resaltar que Franceschi *et. al* [8], contó con el montaje del equipo representado en la Figura 1, en el cual se realizaron diversas corridas de secado estableciendo condiciones de velocidad de rotación del cilindro y potencia de inducción, para cada material textil. Con la data recolectada de cada experiencia se logró la validación de los modelos matemáticos por Franceschi *et. al* [8], Encontrándose desviaciones próximas al 5% con respecto a la data experimental, considerándose de esta manera una estimación que predice satisfactoriamente el comportamiento de variables en el proceso de secado. Las desviaciones se establecieron con respecto a la temperatura del cilindro y la humedad de la tela a la salida del proceso de secado, las cuales se disponían al realizar las corridas para la toma de data experimental en el equipo representado en la Figura 1.

Para realizar la secuencia de cálculos se dividió el cilindro en cuatro zonas, como se presenta en la Figura 2. En cada zona se representa un diferencial de longitud (dZ) con los respectivos flujos de calor presentes.

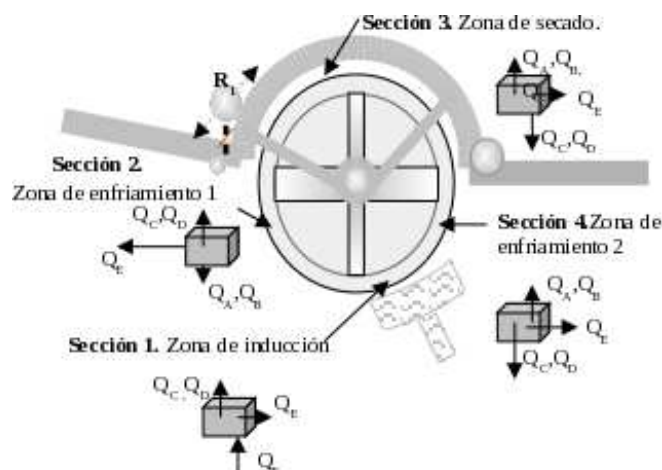


Figura 2: Secciones del cilindro rotatorio para la simulación proceso de secado

Aclarando que según Franceschi *et. al* [8], Q_A , Q_B flujos de calor por convección y radiación respectivamente hacia el ambiente, Q_C , Q_D flujos de calor por convección y radiación respectivamente hacia la parte interna del cilindro, Q_E flujo de calor por conducción a lo largo de la periferia del cilindro y Q_F flujo de calor por inducción. [9]

$$Q_A = hA_C(T_C - T_\infty) \quad (1)$$

Donde A_C es el área total superficial externa del cilindro (m^2), es el coeficiente de transferencia por convección (Wm^{-2}) y T_∞ la temperatura del medio ambiente, e igual a 20 °C. Mientras que la radiación hacia el ambiente (Q_B) esta dada a partir de la ley de Stefan-Boltzmann, mediante [9]:

$$Q_b = F\epsilon\sigma(T_c^4 - T_\infty^4) \quad (2)$$

Donde es F el factor de forma entre el cilindro y el exterior, considerado igual a 1, ϵ es la emisividad de la superficie del cilindro, igual a 0.31 [9] y es la constante de Stefan-Boltzmann, igual a $5,67 \times 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$ La convección entre la superficie interna del cilindro y el eje rotatorio (Q_C) determina por la relación [2]:

$$Q_c = \frac{2\pi k_{eff} L_c (T_c - T_i)}{\ln\left(\frac{D_i}{D_e}\right)} \quad (3)$$

Donde k_{eff} es la conductividad efectiva, T_i es la temperatura del eje de rotación, igual a 25 °C,

D_i es el diámetro interno del cilindro rotatorio (m), De el diámetro del eje rotatorio (m) y la longitud del cilindro (m). Finalmente el calor por radiación interno Q_D se determina por medio de [2]:

$$Q_D = \frac{\sigma A_e (T_c^4 - T_i^4)}{\left[\frac{1}{\epsilon_i} + \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{1}{\epsilon_i} - 1 \right) \right]} \quad (4)$$

A_e es el área superficial del eje (m^2), ϵ_i la emisividad de la superficie interna del cilindro y la del eje, fijándose el valor reportado para la pintura negra, igual a 0.94.

$$\psi = \frac{Q_E}{(Q_A + Q_B + Q_C + Q_D + Q_E)} \quad (5)$$

Para las diferentes experiencias se calculó el término ψ en la zona no inductiva del cilindro, observándose una dependencia exclusiva del mismo en función de la posición del volumen de control móvil sobre esta sección de la periferia del cilindro [8]. De los valores del factor ψ , a diferentes posiciones (Z). De allí se establece la correlación para calcular ψ a partir de Z , de esta manera se determina el calor por conducción Q_E a una posición Z , a partir de la ecuación 5 [2]:

$$Q_{F_{total}} = \frac{1}{L} \int_0^L Q_f(Z) dZ \quad (6)$$

Donde $Q_{F_{total}}$ representa el valor total cedido al volumen de control por la inducción, $Q_f(Z)$ el valor instantáneo para cada posición Z , y L es la longitud de la zona de inducción (m). El balance de energía sobre el volumen de control móvil en la zona de inducción permite calcular la temperatura del cilindro por medio de la ecuación 7. [8]

$$m_c C_p \frac{dT_c}{d\tau} = Q_F - (Q_A + Q_B + Q_C + Q_D + Q_E) \quad (7)$$

En las zonas de enfriamiento se emplea la ecuación 7 pero sin el término Q_F ya que no existe esta transferencia de calor. En la zona de secado se considera un volumen de control del lado del cilindro y se obtiene la siguiente ecuación para el balance de energía [8]:

$$m_c C_p \frac{dT_c}{d\tau} = -[(Q_A + Q_B) \times \theta + Q_C + Q_D + Q_E + Q_G] \quad (8)$$

Donde θ representa la fracción descubierta de la superficie superior del cilindro y Q_G el flujo de energía por conducción desde el cilindro y hacia el textil. Al disponer del modelaje del proceso se prosiguió a realizar el cálculo de manera secuencial entre las cuatro zonas. Para cada sección se establece como limite la longitud (Z) que presenta, definido de la siguiente manera: Sección de inducción: $Z \in [Z_{I_{in}} Z_{I_{fi}}]$ con $Z_{I_{in}} = 0$ y $Z_{I_{fi}} = 270mm$, Sección de enfriamiento #1 : $Z \in [Z_{E1_{in}} Z_{E1_{fi}}]$ con $Z_{E1_{in}} = 270mm$ y $Z_{E1_{fi}} = 600-1105mm$, Sección de secado: $Z \in [Z_{S_{in}} Z_{S_{fi}}]$ con $Z_{S_{in}} = 600-1105mm$ y $Z_{S_{fi}} = 1305mm$, Sección de enfriamiento #2: $Z \in [Z_{E2_{in}} Z_{E2_{fi}}]$ con $Z_{E2_{in}} = 1305mm$ y $Z_{E2_{fi}} = 1435mm$. La posición $Z=0$ corresponde al inicio en la zona de inducción con un tiempo espacial $\tau_I = 0$. En la sección de secado $\tau_S = Z_{S_{in}} / v_{CZ}$. Donde v_{CZ} es la velocidad lineal de la superficie externa del cilindro (ms^{-1}). Condición inicial de las zonas de enfriamiento se establece tiempo espacial $\tau_{E1} = Z_{E1_{in}} / v_{CZ}$ y $\tau_{E2} = Z_{E2_{in}} / v_{CZ}$. El tiempo requerido para completar una revolución del cilindro corresponde a $\tau_{pcil} = P_{cil} / v_{CZ}$, donde P_{cil} es el perímetro del cilindro. Secuencialmente se resuelven las ecuaciones matemáticas ya definidas por Franceschi et.al [8] de cada flujo de calor por zona para cada revolución del cilindro culminando al alcanzar $\tau_{pcil} = P_{cil} / v_{CZ}$. Al tener definida la ruta de cálculo, se creó la interfaz gráfica que presenta las ventanas para el suministro de información requerida para realizar diferentes experiencias y de esta manera, se desarrolló el programa SIMPSET. El programa de simulación se realizó con lenguaje orientado a objeto bajo la plataforma de Delphi. Se realizaron varias experiencias de secado del textil delgado, variando la potencia de inducción (Q_F) y velocidad de rotación del cilindro (ω). Para luego analizar los resultados entregados por el programa de manera de confirmar su buena predicción al comprobar que concuerda teóricamente con resultados esperados. Al disponer de una buena

predicción, se realiza cambios en el diseño del equipo lo cual constituye una utilidad al disponer un simulador que constituye una herramienta para realizar modificaciones y evaluar los resultados obtenidos ante el cambio para verificar si es oportuno o beneficioso aplicar el arreglo en el sistema.

3. RESULTADOS

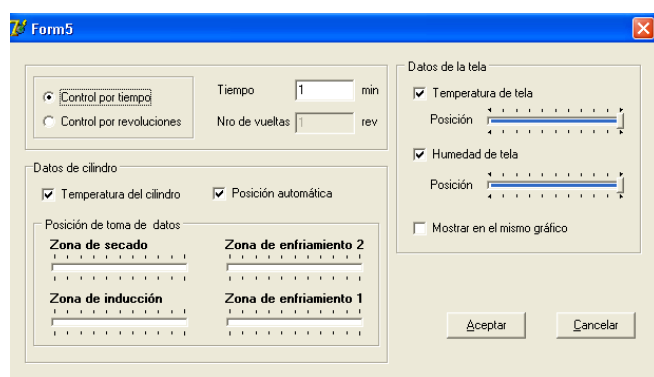


Figura 3: Ventana del programa SIMPSET con las condiciones de tiempo de la simulación



Figura 4: Ventana del programa SIMPSET con los parámetros del cilindro

Para realizar las corridas con el programa SIMPSET se dispone de ventanas para establecer las condiciones del proceso a simular, en las cuales se especifica un control de tiempo, intervalos de integración, parámetros del cilindro, las propiedades del aire, agua y tela, requeridos como datos para la resolución de los modelos

matemáticos. Además se dispone de la opción para graficar las condiciones de temperatura del cilindro y de la tela así como su humedad con respecto del tiempo. A partir de las condiciones de presión y temperatura del medio en el que se realizaron las corridas se determinó por carta psicrométrica la humedad del aire [10] asumiendo que inmediatamente sobre la superficie de la tela el aire esta saturado con el vapor de agua. El calor específico del agua es $0.06985 \text{ W min g}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ [10]. Para la tela se establece el calor específico de $0.02167 \text{ W min g}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ [11]. Para el algodón, la humedad crítica es de 25 g de agua por 100 g de algodón [2]. Para realizar las corridas se disponen de cuatro telas delgadas a base de algodón, las cuales se diferencian entre si por el entrelazado del material ocasionando mayor o menor porosidad del textil lo que influye en el secado del mismo. En la Figura 3, se aprecia que el tiempo de simulación, que corresponde al tiempo que se desea establecer para la simulación del secado, se puede indicar según conveniencia del usuario. En la Figura 4, se establecen los parámetros del cilindro, entre los más relevantes se tienen la velocidad de rotación y potencia de inducción.

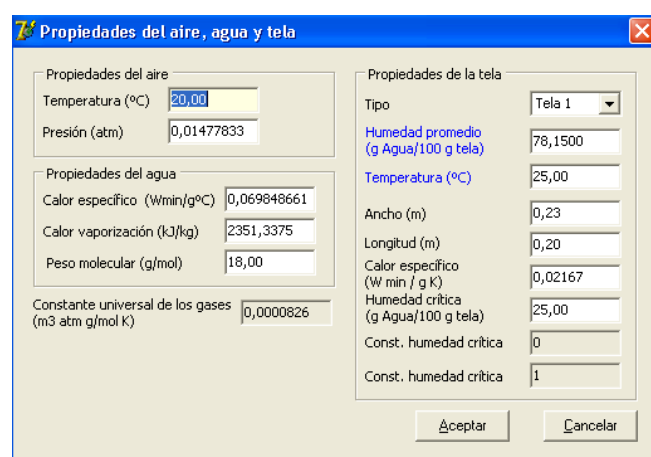


Figura 5: Ventana del programa SIMPSET con las propiedades del aire, tela y agua del proceso a simular

En la Figura 5, se dispone de la opción de fijar las propiedades del aire, tela y agua del proceso a simular. Para la resolución de los modelos matemáticos se requiere especificar los datos de integración que se establecen en la Figura 6. Se realizaron corridas con las cuatro

telas seleccionándose la tela 1 para presentar los resultados brindados por el programa SIMPSET ya que es necesario comparar y analizar los resultados estableciendo un tipo de tela en la ventana correspondiente (Figura 5).



Figura 6: Ventana del programa SIMPSET con los datos de integración

Se estableció un tiempo de treinta minutos para una potencia inducida al cilindro (Q_F) de 7.02 kW que corresponde a un 60 % de la capacidad máxima, con una velocidad de rotación(ω) de 0,94 rev/min.

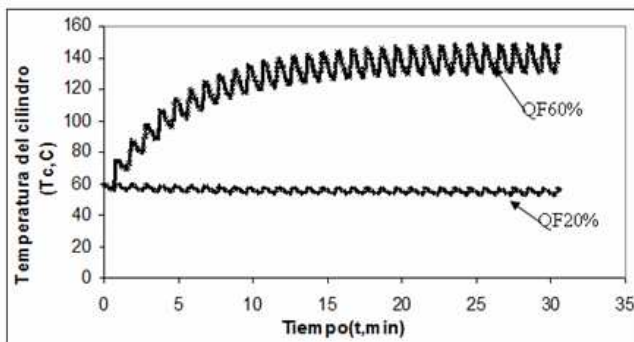


Figura 7: Temperatura del cilindro (0,94 rpm, Q_F de 60 % y 20 %)

Apreciándose en la Figura 7, el incremento de la temperatura del cilindro al ser calentado por los

inductores y luego el enfriamiento en las zonas restantes. Presentándose el mayor descenso de la temperatura en la zona de secado del textil. Además se muestra el comportamiento de la temperatura de la tela y de su humedad, Figura 8 y 9. A medida que se incrementa la temperatura del cilindro aumenta la de la tela lo que ocasiona la disminución de humedad en la misma.

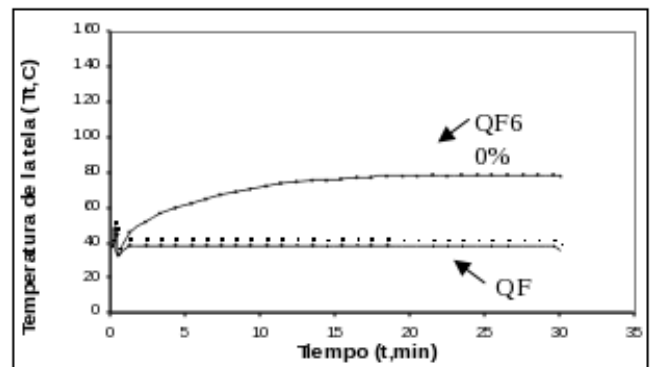


Figura 8: Temperatura de la tela (0,94 rpm, Q_F de 60 % y 20 %)

Se realizó una segunda corrida disminuyendo la potencia inducida a 20 % de su capacidad máxima (2.34 kW), observándose que se alcanzan temperaturas del cilindro inferiores a las obtenidas en el caso anterior (Figura 7), lo que conlleva a menores temperaturas de la tela y por tanto una menor disminución del contenido de humedad en el textil (Figuras 8 y 9).

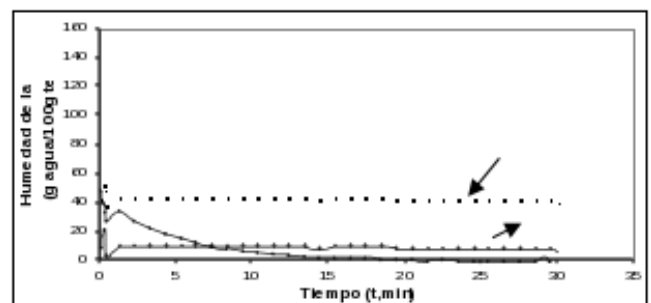


Figura 9: 9. Humedad de la tela (0,94 rpm, Q_F de 60 % y 20 %)

En las Figuras 7, 8 y 9 se aprecia que al calentar el cilindro con una potencia de inducción mayor se presentan temperaturas superiores en el cilindro y en la tela, lo que ocasiona una disminución de la humedad del material textil.

Se realizó una tercera corrida con una potencia inducida del 20 %, incrementando la velocidad de rotación del cilindro a 2 rev/min para el mismo tipo de tela.

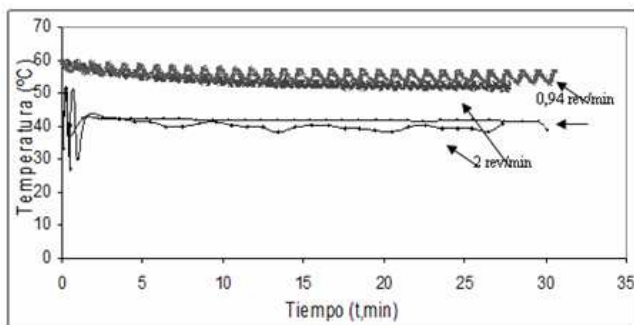


Figura 10: Temperatura del cilindro y de la tela (0,94 y 2 rpm, Q_F 20 %)

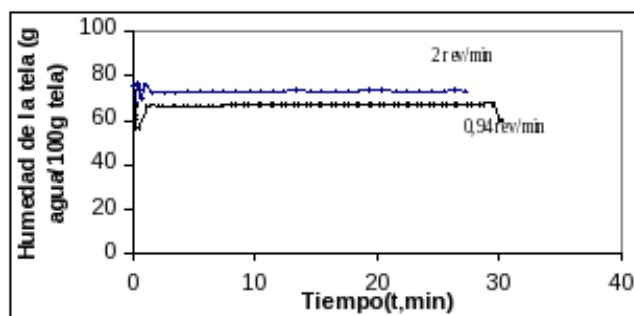


Figura 11: Humedad de la tela (0,94 y 2 rpm, Q_F 20 %)

En las Figuras 10 y 11 se comparan la temperatura del cilindro, de la tela y su humedad al someterlo a una misma potencia inducida del 20 % pero a diferentes velocidades rotación. Se aprecia que las mayores temperaturas alcanzadas para cada velocidad corresponden a las del cilindro. Al incrementarse la velocidad se aprecia menores temperaturas en el cilindro ocasionado por la rapidez de giro del mismo, debido a ello se alcanzan menores temperaturas de la tela y un mayor contenido de humedad en la misma. El programa de simulación SIMPSET además de calcular las condiciones del proceso, permite construir las graficas de temperatura del cilindro, de la tela y su humedad con respecto al tiempo.

Con los resultados evaluados se puede confirmar el carácter predictivo del simulador SIMPSET ya que concuerdan con lo esperado teóricamente.

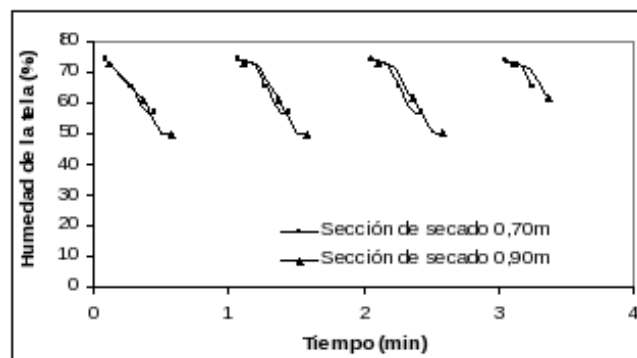


Figura 12: Porcentaje de humedad de la tela al aumentar el perímetro de la zona de secado.

Al disponer del programa se tiene una herramienta que permite realizar modificaciones en las condiciones del proceso y de esta manera poder evaluar sus efectos en temperatura del cilindro, temperatura y humedad de la tela. Otro beneficio de contar con el programa consiste en la facilidad de realizar modificaciones en las características del equipo para evaluar cuales serian sus efectos antes de realizarlos en el equipo actual. En este aspecto se prosiguió a plantear algunos casos que pueden permitir una menor humedad de la tela a la salida del proceso de secado, manteniendo 20 % de potencia de inducción y velocidad de rotación de 0,94 rev/min. Se inició aumentando el perímetro de la zona de secado disminuyendo el perímetro de la zona de enfriamiento #1. Como se aprecia en la Figura 12, se obtienen menores porcentajes de humedad de la tela, con una disminución del 37,77 %, mientras que con las condiciones actuales del equipo se esta obteniendo un 30,62 % de disminución de humedad de la tela.

Otra modificación planteada consiste en un incremento de la temperatura del cilindro a la entrada de la zona de secado en 20 °C, de esta manera se obtiene una disminución de la humedad de la tela en 39,57 % (Figura 13).

Por último se estudia el caso de trabajar con un cilindro de mayor perímetro aumentando a 2m siendo que actualmente dispone de 1,4363m. De esta manera se produce una disminución de la humedad de la tela (Figura 14) en un 36,48 %.

Estos casos planteados permiten valorar el beneficio de disponer de un programa de simulación

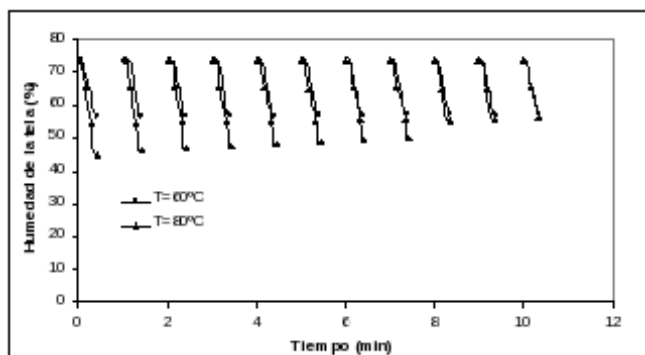


Figura 13: Porcentaje de humedad de la tela al aumentar la temperatura del cilindro a la entrada de la zona de secado.

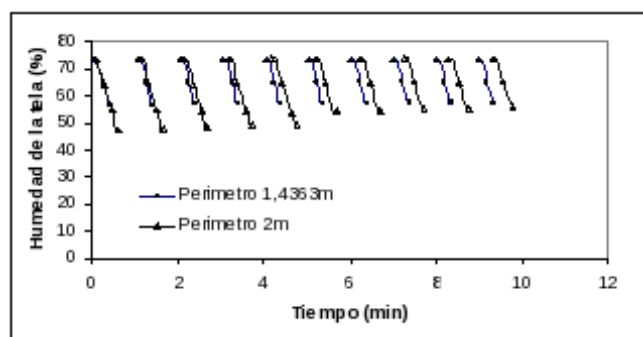


Figura 14: Porcentaje de humedad de la tela al aumentar el perímetro del cilindro.

ya que se pueden realizar diversos cambios para evaluar según disponibilidades y conveniencias variaciones en las características del equipo actual.

De esta manera se muestra el beneficio de disponer un simulador que permite realizar modificaciones al sistema.

4. CONCLUSIONES

El carácter predictivo del programa SIMPSET si concuerda con el comportamiento teórico esperado. Por esta razón permite estudiar el proceso de secado de telas delgadas a base de algodón, de manera de predecir el comportamiento de la temperatura del cilindro, de la tela y su humedad ante la variación de condiciones de operación como la potencia de inducción y la velocidad de rotación del cilindro, además de ser una herramienta útil para dar mejoras futuras al proceso ya que permite realizar cambios en el diseño del equipo.

Referencias

- [1] Dhib, R. (2007). "Infrared Dryin; From Process Modeling to Advanced Process Control", *Drying Technology*, 25(1), 97 – 105.
- [2] Pérez, S., Therien, N., Broadbent, A.D.(2001). "Modelling the continuous drying of a thin sheet of fibres on a cylinder heated by electric induction". *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 79,Nº6, 977-989.
- [3] Feng,H., Tang J., Cavalieri R., Pluma O.(2001). Heat and mass transport in microwave drying of porous materials in a spouted bed. *AIChE Journal*,47,Nº7,1499-1512.
- [4] De Kuang, H. (1994). *Le séchage du papier par infrarouge*. Thèse doctorat, Université Laval. Canadá.
- [5] Fan J. y X. Wen. (2002). "Modeling Heat and Moisture Transfer Through Fibrous Insulation with Phase Change and Mobile Condensate", *International Journal of Heat and Mass Transfer*: 45, 4045-4055.
- [6] Jang, J. Y. y Y. W. Chiu (2007). "Numerical and Experimental Analysis for a Metallic Hollow Cylinder Subject to Step-wise Electro-magnetic Heating", *Applied Thermal Engineering*: 27, 1883-1894.
- [7] Lu, T. y S.Q. Shen. (2007). "Numerical and Experimental Investigation of Paper Drying: Heat and Mass Transfer with Phase Change in Porous Media", *Applied Thermal Engineering*: 27, 1248-1258.
- [8] Franceschi, K., S. Pérez, Z. Niño y D. Magarelli. (2008). "Modelado y Simulación del Secado de Textiles Delgados Mediante un Cilindro Calentado por Inducción Eléctrica". *Inf. tecnol.*, 19(4), 35-46. <http://www.citchile.cl>
- [9] Incropera F. y De Witt D. (1999): "Fundamentos de Transferencia de Calor". 4ta edición, Prentice Hall. México.
- [10] Perry, r. (1992). *Perry Manual del Ingeniero Químico*. Sexta edición. Editorial McGraw-Hill. México.
- [11] Rohsenow,W. Hartnett, J. Cho, Y. (1998). *Handbook of heat transfer*. Tercera edición. Editorial McGraw-Hill Handbooks. Estados Unidos de América.