

Modelado y Simulación del Secado de Textiles Delgados Mediante un Cilindro Calentado por Inducción Eléctrica

Katiuska Franceschi, Sergio Pérez, Zulay Niño y Donato Magarelli

Universidad de Carabobo, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química, Bárbula, Valencia-Venezuela (e-mail: sperez@uc.edu.ve)

Resumen

Se presenta el desarrollo de un modelo matemático para el secado de textiles delgados utilizando un cilindro calentado por inducción eléctrica. Primeramente, se estudia la dinámica térmica del cilindro rotatorio mediante las ecuaciones que describen los procesos de transferencia de calor durante el enfriamiento y calentamiento del mismo. Luego, se caracteriza la variación de la temperatura del cilindro, humedad y temperatura del textil a lo largo de la zona de secado. Los valores obtenidos para estas variables características a partir del modelo se validaron con datos experimentales, a diferentes condiciones de operación. Los resultados obtenidos mediante el modelo muestran valores muy próximos a los experimentales, con desviaciones inferiores a 10%.

Palabras clave: inducción eléctrica, modelado, cilindro rotatorio, secado, transferencia de calor

Modeling and Simulation of Thin Fabrics Drying using a Cylinder Heated by Electrical Induction

Abstract

The development of a mathematical model for the drying of thin fabrics using a rotatory cylinder heated by electrical induction is proposed in this work. Firstly, the thermal dynamics of the cylinder is studied using the equations that describe the energy transfer during the cooling and heating steps of the cylinder. After that, the model determines the temperature for the cylinder, the humidity and the temperature in the drying zone. The values obtained for these variables from the mathematical model were validated with experimental data at different operating conditions. The results show small deviations between predicted values and experimental data, with deviations lower than 10%.

Keywords: electrical induction, modeling, rotating cylinder, drying, heat exchange

INTRODUCCION

A nivel industrial el proceso de secado de fibras textiles y papel, comúnmente se realiza a partir de la transferencia de calor, por contacto directo con cilindros calentados por medio de aire caliente o vapor sobrecalentado, o bien con aire seco en dirección opuesta a la migración de la humedad. Estos procesos tradicionales de secado se caracterizan por un alto consumo de energía para el secado el material. Actualmente se disponen de nuevas tecnologías, que utilizan electricidad en su principio de secado tales como, microondas, radio frecuencia e infrarrojos, las cuales se caracterizan por un menor consumo de energía (Dhib, 2007; Feng et al., 2001)

Por otra parte, el desarrollo de modelos matemáticos para estas diferentes alternativas de secado de materiales porosos, igualmente es un campo de mucho desarrollo, disponiéndose en la literatura de diferentes modelos que consideran, en su mayor parte los mecanismos ligados al proceso de secado en si (contacto directo, conveccion, radiación), considerando solo el comportamiento del material húmedo y el mecanismo de secado utilizado, tales como difusión capilar, evaporación y condensación (Lee et al.; 2002, Jang y Chiu, 2007; Lu y Shen, 2007), y sin considerar la aplicación del calentamiento eléctrico durante el proceso de secado.

El secado de textiles mediante cilindros calentados por inducción electromagnética, es una tecnología reciente (Fan y Wen, 2002, Pérez et al., 2001), y es la técnica considerada en este trabajo. Se propone desarrollar un modelo matemático que permita determinar la variación de la humedad y temperatura de textiles delgados, considerando como parte del modelo variables de tipo operacional como la velocidad de rotación del cilindro, potencia eléctrica suministrada a los inductores y la superficie de contacto entre el material textil y la superficie caliente del cilindro, así como igualmente características físicas del material textil utilizado. Como parte del mismo, se dispone de un montaje piloto que permitirá la recolección de datos operacionales durante el secado a fin de validar el modelo matemático propuesto.

EQUIPO Y METODOLOGÍA

El proceso consiste en poner en contacto la tela húmeda en movimiento con un cilindro metálico rotatorio hueco, cuya superficie es calentada por inducción eléctrica. Para el calentamiento se emplean tres inductores electromagnéticos ubicados a la proximidad de la superficie del cilindro, ocupando un 18.5% de la superficie total. Los inductores disponen de una potencia máxima de 10.5 KW. Para la rotación del cilindro se utiliza un motor de 1 Hp, con una velocidad máxima de rotación de 14.3 rev/min. La velocidad de rotación del cilindro puede ser ajustada. El material poroso es mantenido en contacto con el 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 se puede contar con una superficie máxima y mínima de 1621.5 cm² y 471.5 cm² respectivamente. La Fig. 1 presenta la zona de secado y las diferentes zonas correspondientes a cada sección del cilindro.

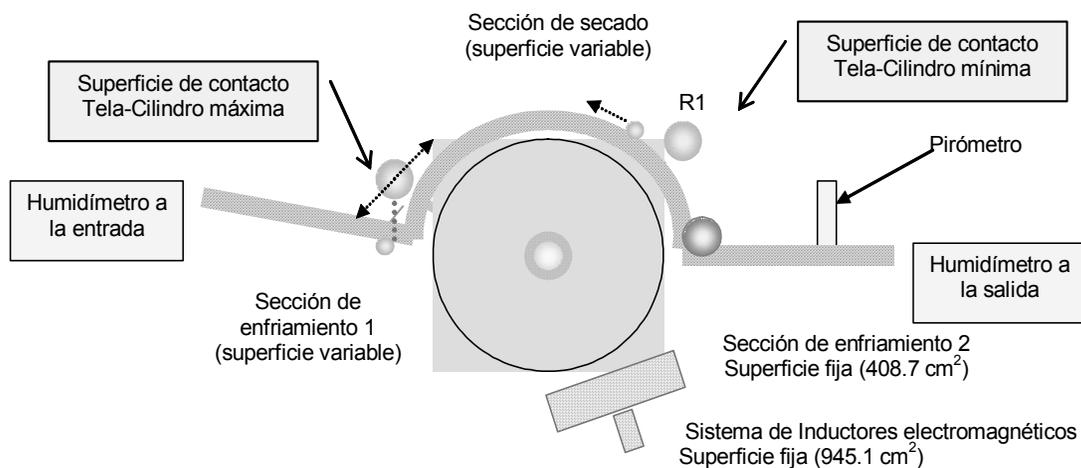


Fig. 1: Representación de las distintas secciones presentes sobre la superficie del cilindro rotatorio.

DESARROLLO DEL MODELO Y RESULTADOS

A los fines del desarrollo del modelo, primeramente se llevan a cabo las experiencias para la cuantificación de las pérdidas de energía a través de los procesos de convección, radiación y conducción asociados a un cilindro rotatorio caliente. Posteriormente, se realizan otras experiencias para caracterizar el proceso de inducción de energía sobre el cilindro. Finalmente, se realizan experiencias considerando el secado como tal, utilizando diferentes fibras textiles.

Pérdidas de energía por convección y radiación

Se dispone de datos experimentales de la temperatura del cilindro durante el enfriamiento del mismo, los cuales fueron recolectados en la planta piloto, para ello se calentó el cilindro mientras giraba a una alta velocidad, de manera de garantizar un calentamiento uniforme de su superficie, y evitar gradientes de temperatura a lo largo de su periferia. La data experimental de temperaturas de enfriamiento es obtenida por medio de una termocupla ubicada en el interior de la pared del cilindro.

Esta condición isotérmica del cilindro permite fijar como volumen de control todo el cilindro y estudiar las pérdidas de calor durante el enfriamiento, debido a la convección y radiación. El enfriamiento natural del cilindro se estudio a diferentes velocidades de rotación (0.97, 3.26, 9.93 y 12.1 rev/min).

En el proceso de enfriamiento, y dado que el cilindro es hueco en su interior, se consideran las pérdidas de energía por convección y radiación hacia el ambiente, además de las perdidas por estos mismos mecanismos hacia la cavidad interna del cilindro. Aplicando un balance de energía en todo el cilindro se obtiene:

$$m_c C_{p_c} \frac{dT_c}{d\tau} = -(Q_A + Q_B + Q_C + Q_D) \quad (1)$$

Donde m_c es la masa total del cilindro (kg), C_{p_c} el calor específico del material de construcción del cilindro, acero e igual a $8.214 \text{ W min Kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, T_c es la temperatura del cilindro ($^\circ\text{C}$), τ el tiempo de enfriamiento (min), Q_A y Q_B son los calores perdidos por convección y radiación hacia el ambiente respectivamente (W), Q_C y Q_D son los calores por convección y radiación intercambiados entre la superficie interna del cilindro y el eje rotatorio (W).

Para evaluar las pérdidas de energía por convección se tiene, que el calor convectivo Q_A hacia el ambiente esta dado por la ley de Newton:

$$Q_A = hA_c (T_c - T_\infty) \quad (2)$$

Donde A_c es el área total superficial externa cilindro (m^2), h es el coeficiente de transferencia por conveccion (W m^{-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:

$$Q_B = F \varepsilon \sigma (T_c^4 - T_\infty^4) \quad (3)$$

Donde F es 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 (Incropera y DeWitt, 1996) y σ es la constante de Stefan-Boltzmann, igual a $5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$.

La convección entre la superficie interna del cilindro y el eje rotatorio (Q_C) de determina por la relación:

$$Q_c = \frac{2\pi k_{eff} L_c (T_c - T_i)}{\ln\left(\frac{D_i}{D_e}\right)} \quad (4)$$

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), D_e el diámetro del eje rotatorio (m) y L_c la longitud del cilindro (m). Finalmente el calor por radiación interno Q_D se determina por medio de:

$$Q_D = \frac{\sigma A_e (T_c^4 - T_i^4)}{\left[\frac{1}{\varepsilon_i} + \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{1}{\varepsilon_i} - 1 \right) \right]} \quad (5)$$

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.

A partir de la integración numérica del balance de energía durante el enfriamiento del cilindro (ec. 1), se procede a calcular las temperaturas del mismo, teniéndose entonces el perfil de temperatura a partir del modelo matemático, el cual es comparado con el experimental, a las diferentes velocidades de rotación.

Validación del modelo para el proceso de enfriamiento del cilindro

Inicialmente se evaluó el proceso de enfriamiento a una velocidad de rotación del cilindro de 0.97 rev/min, tomando en cuenta sólo la existencia de los calores de convección y radiación (Q_A y Q_B) hacia el ambiente, observándose una desviación con respecto a los datos experimentales al comparar la temperatura medida con la obtenida a partir del modelo matemático. Por tal razón se incorporan los otros términos a fin de considerar el calor por convección y radiación entre el cilindro y el eje rotatorio (Q_C) y (Q_D). Bajo estas consideraciones, los perfiles de temperatura experimental y a partir del modelo matemático se aproximan aceptablemente, tal como se observa en la Fig. 2.

Sin embargo, al validar el comportamiento del modelo con los datos experimentales, a velocidades de rotación mayores (3.26, 9.93 y 12.1 rev/min), se aprecia una desviación del perfil de temperatura obtenido del modelo con respecto al experimental. Esta desviación es atribuida a que al estar girando el cilindro, la conductividad efectiva (K_{eff}) debe presentar un valor menor en comparación al que presenta al estar inmóvil, condición para la cual es válida la correlación utilizada en la determinación del término Q_C .

Por tal razón, se determinó un factor correctivo lambda (λ) que permite ajustar el valor de la conductividad efectiva real al incrementar la velocidad de rotación. La inclusión del factor lambda (λ), permite obtener un perfil de temperatura a partir del modelo matemático muy próximo al experimental para todo el rango de velocidades de rotación y de temperaturas del cilindro utilizadas, presentando una diferencia entre ambas no mayor a 5 °C, lo cual corresponde a una desviación menor a 5%.

Conducción al interior de la pared del cilindro

Al considerar un calentamiento local en la zona de inducción del cilindro a una baja velocidad de rotación a fin de lograr una mayor tiempo de contacto durante el secado, y una vez debido al contacto con el textil húmedo, es de esperarse un gradiente importante de temperatura a lo largo de la periferia del cilindro, lo que inducirá sin dudas a un flujo de calor por conducción a lo largo de la periferia del mismo. A los fines de contabilizar este flujo de calor, presente durante la operación real del secador, se propone la siguiente etapa experimental.

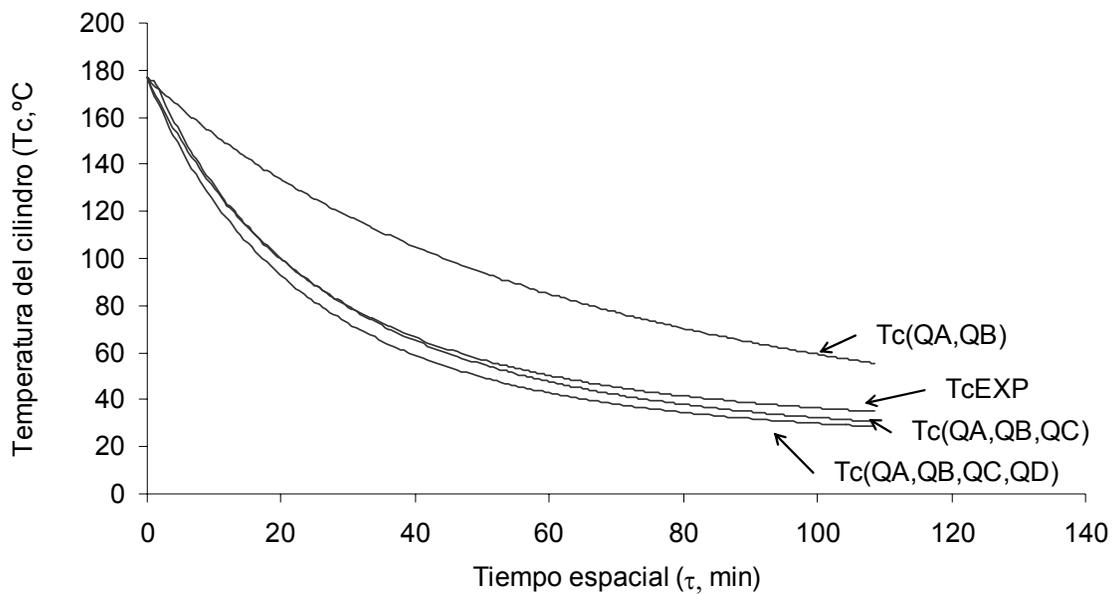


Fig. 2: Perfiles de temperatura experimental y a partir del modelo matemático a 3.26 rev/min.

Para la recolección de datos empleados para esta parte el cilindro se hizo girar a bajas velocidades de rotación (0.22, 1.2, 1.4, 2.7 y 4.6 rev/min.). A los fines del presente análisis, se considera un volumen de control móvil que se desplaza a lo largo de la periferia del cilindro. En tal sentido, se propone un análisis de tipo diferencial basado en el concepto de la derivada substancial. En este caso la variable de tiempo se define por el tiempo espacial, determinado por el tiempo que toma el volumen de control en desplazarse una distancia Z sobre la periferia del cilindro.

Al pasar el volumen de control móvil (derivada substancial) por la zona de inducción se calienta y luego se enfría al moverse por las zonas no inductivas del cilindro. Esto se realizó a diferentes potencias de inducción. De esta manera se recolectó la data experimental de la temperatura del cilindro en un punto móvil, por medio de la termocupla instalada en el interior de la pared del cilindro, tanto para la zona de enfriamiento como de calentamiento por inducción.

Al realizar este proceso a velocidades bajas se tiene entonces un gradiente de temperatura en la periferia del cilindro, lo que promueve la existencia de una transferencia de calor por conducción adicional al convectivo y por radiación estudiados en la primera fase del trabajo. En el esquema reportado en la Fig. 3, se ilustra el término de energía adicional correspondiente al calor por conducción (Q_E), y los ya tomados en cuenta en la parte inicial. El balance de energía sobre el volumen de control móvil queda dado por:

$$m_c C_{pc} \frac{dT}{dt} = -(Q_A + Q_B + Q_C + Q_D + Q_E) \tag{6}$$

En base a observaciones de los resultados para los diferentes términos de energía y con el objetivo de simplificar el modelo matemático, se establece una relación entre el flujo de calor por conducción y los calores por convección, radiación y conducción, por medio de la ecuación siguiente:

$$\psi = \left(\frac{Q_E}{Q_A + Q_B + Q_C + Q_D + Q_E} \right) \tag{7}$$

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. De los valores del factor Ψ , a diferentes posiciones (Z). De allí se establece la correlación dada a continuación para representar dicha dependencia.

$$\psi = 0,75010662 - 1.2902485 Z + 0.3519805Z^3 + 0.41336638 Z^{0.5} \tag{8}$$

El calor por conducción Q_E se determina a una posición Z , a partir de la ecuación 7 empleando el factor Ψ calculado por la ecuación 8, y de los calores de convección y radiación en dicha posición a la temperatura de cilindro correspondiente, por medio de las ecuaciones de la sección anterior.

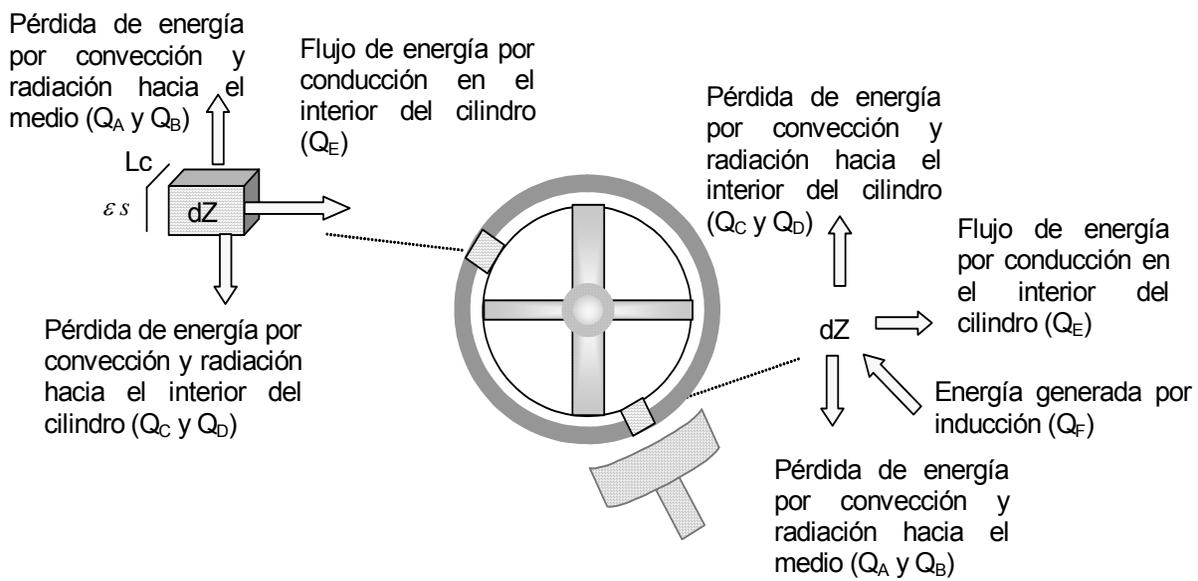


Fig. 3: Representación esquemática de los modos de transferencia de calor en el cilindro

De la ecuación 6 se obtienen los perfiles de temperatura por medio la integración numérica del modelo matemático, igualmente validados con los datos disponibles a las velocidades de 0.22, 1.4, 2.7 y 4.6 rev/min. Los valores de temperatura del cilindro determinados a partir del modelo matemático, presentan una desviación máxima de 6 %, lo cual permite considerar que el modelo representa al sistema de manera satisfactoria al cilindro aun cuando exista un gradiente de temperaturas a lo largo de la periferia del mismo. En la Fig. 4 se puede apreciar la proximidad existente entre las temperaturas del cilindro generadas a partir del modelo matemático y las temperaturas experimentales.

Modelado del proceso de inducción electromagnética de energía en una pared metálica.

De total de datos experimentales obtenidos en el punto anterior, parte de ellos se corresponden a las temperaturas experimentales del cilindro medidas en la zona de calentamiento por inducción.

El balance de energía sobre el volumen de control móvil en la zona de calentamiento, como se representa en la Fig. 3, incluye un término adicional correspondiente al calor por inducción suministrado al cilindro (Q_F). El modelo matemático que permite considerar la energía por inducción electromagnética a la que se expone el cilindro, o calor por inducción (W) está dado por:

$$m_c C_p c \frac{dT_c}{d\tau} = Q_F - (Q_A + Q_B + Q_C + Q_D + Q_E) \tag{9}$$

En esta etapa se calcula la energía recibida por el cilindro efecto de la inducción, para diferentes porcentajes de la máxima potencia disponible, a partir de la que es alimentada a los inductores (20, 30, 40, 60, 70 y 90%).

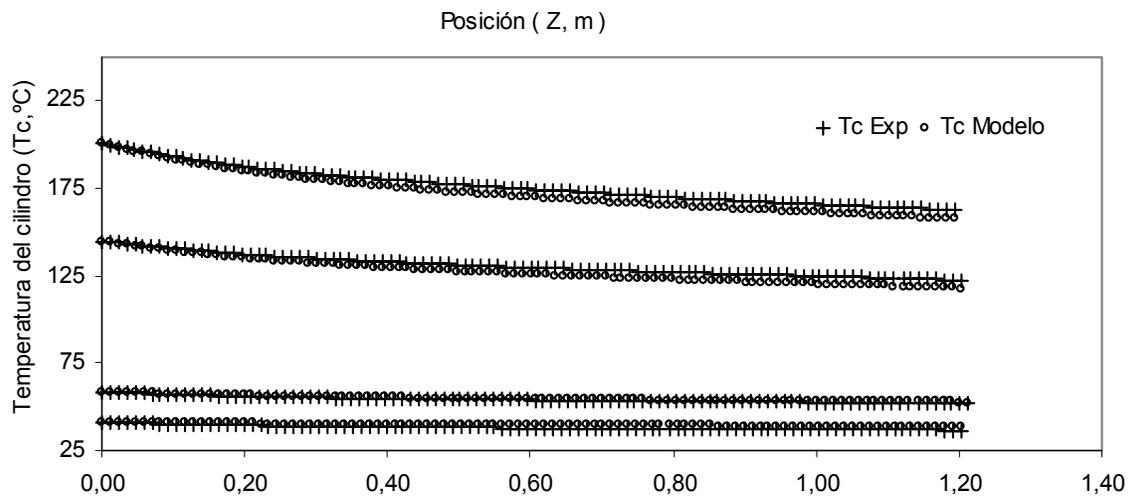


Fig. 4: Comparación de los perfiles de temperaturas experimentales y a partir del modelo matemático a una velocidad de rotación del cilindro de 0.2 rev/min a diferentes posiciones Z.

A partir del balance de energía planteado en la ecuación 9 se determina el calor por inducción (Q_F) a diferentes posiciones del cilindro en la zona de inducción. Luego a partir de los flujos de calor puntales se determina al calor total inducido al cilindro, mediante la relación siguiente:

$$Q_{F_{total}} = \frac{1}{L} \int_0^L Q_F(Z) dZ \tag{10}$$

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). Si se determina una relación entre el calor instantáneo por inducción para cada posición Z y el calor total por inducción, se define así un factor de inducción local (η), dado por:

$$\eta = \frac{Q_F(Z)}{Q_{F_{total}}} \tag{11}$$

Con el propósito de caracterizar el calor por inducción dentro del modelo matemático, si se define una posición normalizada para la zona inducción, dada por Z/L, y así tener una posición espacial entre cero y uno, se observó al graficar el factor de inducción con respecto a esta posición normalizada lo mostrado en la Fig. 5.

De allí se nota que la fracción de energía inducida al cilindro es independiente del porcentaje de la potencia de inducción utilizada, y solamente depende de la posición en la zona de inducción, lo que demuestra el carácter localizado de la inducción, así como se evidencia igualmente la presencia de las dos bobinas en cada inductor. Esta relación fue caracterizada por medio de una serie de Fourier.

De los resultados obtenidos para diferentes porcentajes de la potencia alimentada a los inductores (20, 30, 40, 60, 70 y 90) se puede apreciar que la mayoría de los valores de temperatura determinadas con el modelo son muy próximas a las experimentales con desviaciones inferiores al 5%, lo que permite considerar que el modelo presenta un buen carácter predictivo del comportamiento térmico del cilindro.

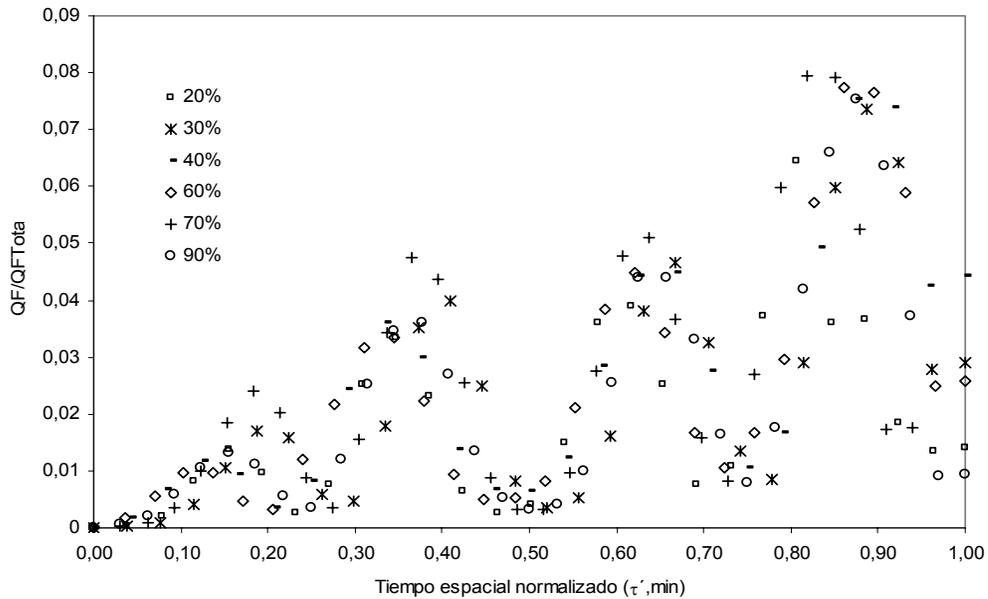


Fig. 5: Factor de inducción en función de la posición a diferentes potencias de inducción

La Fig. 6 presenta perfiles experimentales y calculados a partir del modelo en la zona de inducción, para una potencia de calentamiento del 20%.

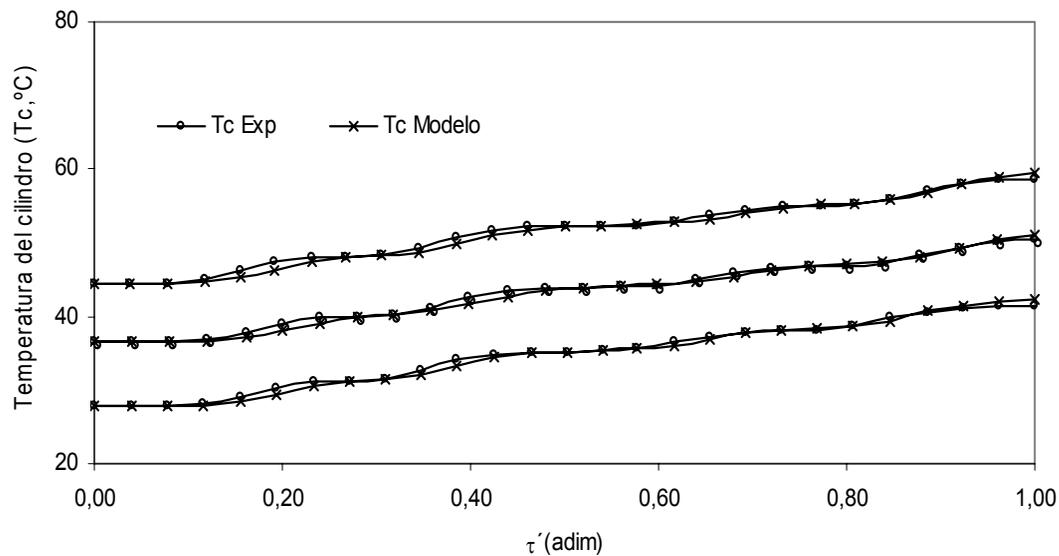


Fig. 6: Perfiles de temperaturas experimentales y a partir del modelo matemático para un porcentaje de inducción del 20%

Modelado del secado con un cilindro rotatorio calentado por inducción electromagnética.

Como se ilustra en la Fig. 1, el cilindro rotatorio se puede seccionar en cuatro zonas, la de inducción, zonas de enfriamiento y la zona de secado. En la Fig. 7 se representa esquemáticamente el proceso de secado a los fines del desarrollo de los balances de energía y de masa. Si se considera un volumen de control del lado del cilindro se obtiene la siguiente ecuación para el balance de energía:

$$m_c C p_c \frac{dT_c}{d\tau} = -[(Q_A + Q_B) \times \theta + Q_C + Q_D + Q_E + Q_G] \tag{12}$$

Donde θ representa la fracción descubierta de la superficie superior del cilindro. A partir de la ecuación 12, dada la disponibilidad de la medición de la temperatura del cilindro (T_c) a lo largo de la zona de secado se determina el flujo de energía por conducción desde el cilindro y hacia el textil (Q_G).

Por otra parte, al plantear el balance de energía ahora considerando el volumen de control sobre la tela, se tiene:

$$m_{th} C_{p_{th}} \frac{dT_t}{d\tau} = Q_G - Q_{lat} - Q_{ct} \tag{13}$$

De la ecuación 13, se determina el calor latente (Q_{lat}) requerido para evaporar el agua presente en la tela para un subintervalo dZ , dada la disponibilidad de mediciones de la temperatura de la tela a lo largo de la zona de secado, obtenidas a través de un pirómetro óptico.

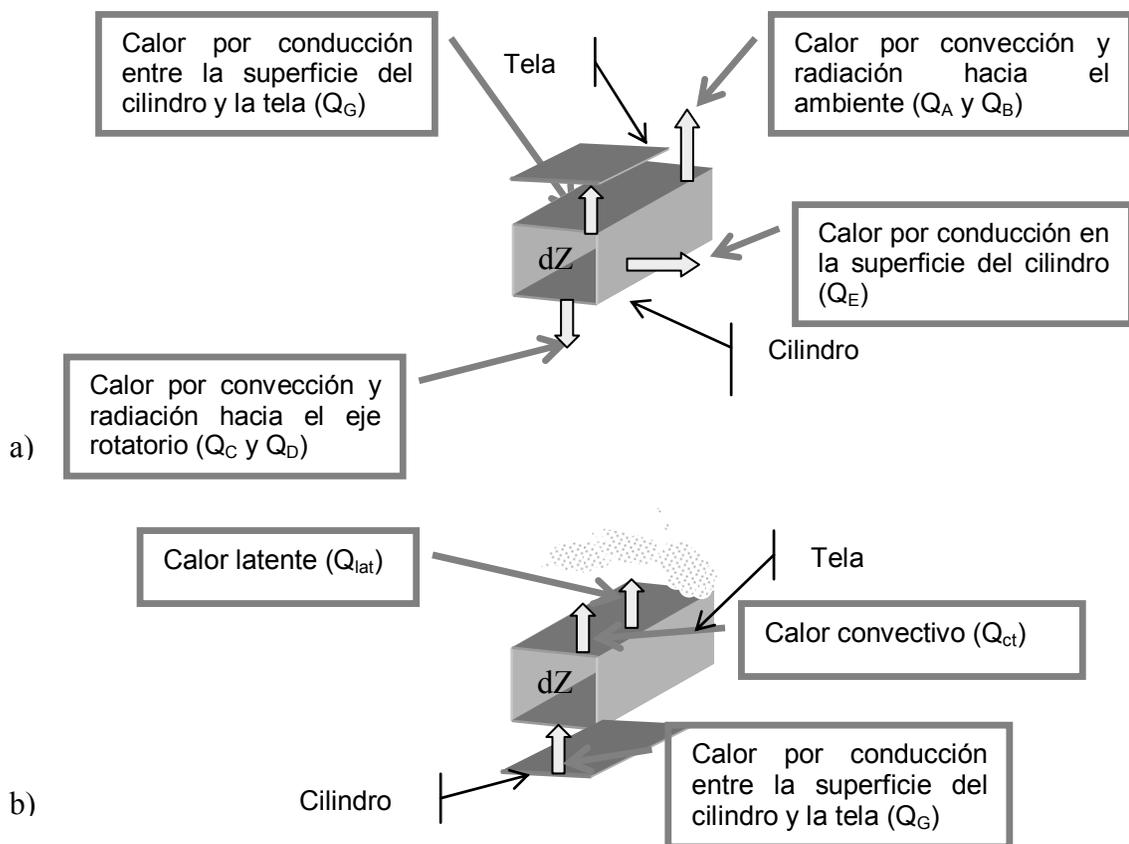


Fig. 7: Representación esquemática para la aplicación del balance de energía: a) del lado del cilindro y b) de lado de la tela.

Donde m_{th} es la masa de tela húmeda (g), $C_{p_{th}}$ es el calor específico de la tela húmeda ($W \text{ min g}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), T_t es la temperatura de la tela ($^\circ\text{C}$), Q_{lat} es el calor latente para la vaporización del agua (W), y Q_{ct} es el calor convectivo desde la tela hacia el medio externo (W), y determinado por medio:

$$Q_{ct} = hL_t dZ (T_t - T_\infty) \tag{14}$$

Donde L_t es la longitud de la tela, e igual a 0.20 m, dZ es la longitud recorrida por el volumen de control guante un intervalo de tiempo espacial $d\tau$.

Del balance de masa sobre el volumen de control considerado se tiene que la humedad a la salida del proceso de secado se determina por medio de la ecuación siguiente, en la cual se expresa la derivada substancial de la humedad:

$$\frac{m_{ts}}{100} \left(\frac{DH_t}{D\tau} \right) = -M_{evap} \quad (15)$$

Donde H_t es la humedad de la tela (g de agua/100 g de textil seco), M_{evap} es la tasa de agua evaporada (g s⁻¹), m_{ts} es el flujo de de tela seca (g s⁻¹). Del calor latente (Q_{lat}) calculado del balance de energía dado por la ecuación 13, se tiene que la tasa de agua evaporada del textil a lo largo de la sección se secado está determinada por:

$$M_{evap} = \frac{Q_{lat}}{h_{fg}} \quad (16)$$

Donde h_{fg} es el calor de vaporización para el agua (J g⁻¹). De la integración numérica de la ecuación 15 en la zona de secado, es posible entonces determinar el perfil de humedad de la tela desde la entrada hasta la salida de esta sección del cilindro.

Validación experimental del proceso de secado de textiles

El modelo matemático propuesto para el secado continuo de un material textil fue validado con datos provenientes del secado de cuatro tipos de textiles delgados diferentes, de las cuales la Tela 1 es la mas delgada, de tejido muy fino y de algodón, la Tela 2 es de textura mas dura, de tejido mas grueso y de material a base de algodón y poliéster, las Tela 3 y 4 son de tejido mas gruesos, apreciándose en la Tela 4 presenta una fibra similar a la Tela 2, es decir una mezcla algodón-poliéster. La Fig. 8 muestra una foto microscópica que ilustra las características de las cuatro telas utilizadas.

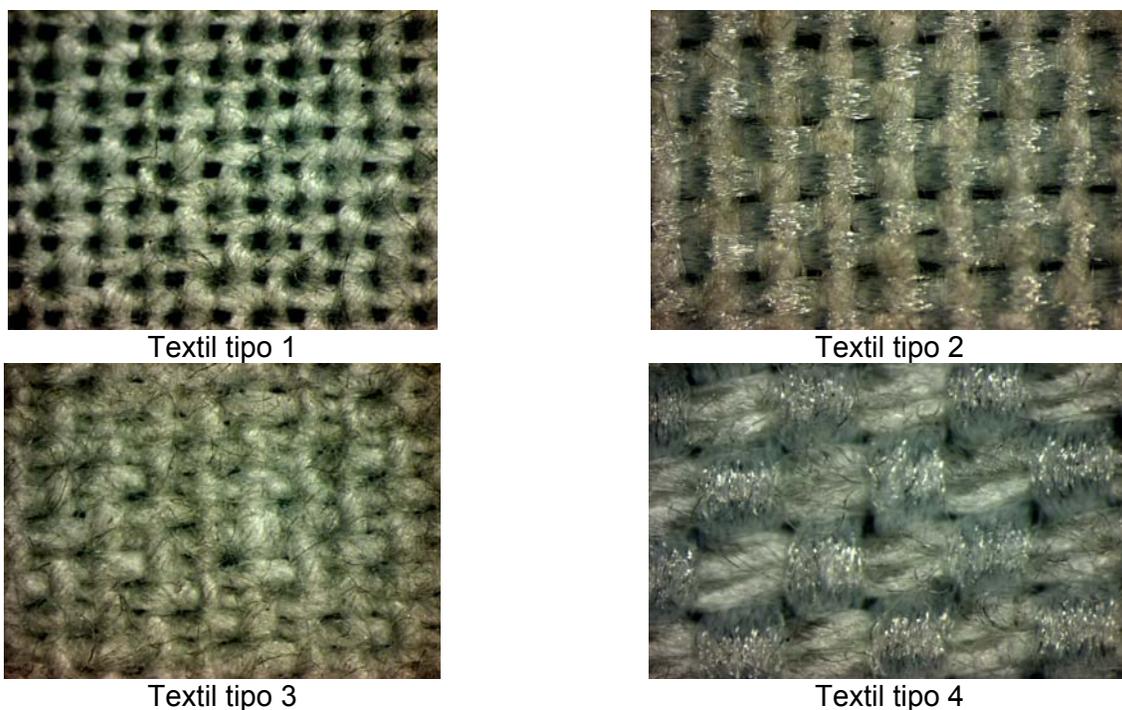


Fig. 8: Fotos microscópicas de los diferentes textiles usados en los experimentos.

Por otro lado, el modelo matemático fue validado con datos provenientes del montaje experimental donde se realizaron múltiples ensayos a diferentes condiciones de operación, considerando perturbaciones en la potencia alimentada a los inductores, velocidad de rotación y la superficie de contacto entre el textil y la superficie caliente del cilindro. Las Figs. 9 y 10 presentan los respectivos

perfiles para la humedad del textil y temperaturas del cilindro a la entrada y salida de la sección de secado del cilindro para una experiencia con perturbaciones en la potencia de inducción, durante el secado de un textil tipo 1. De allí se observa el buen ajuste del modelo propuesto a los datos experimentales obtenidos del montaje piloto.

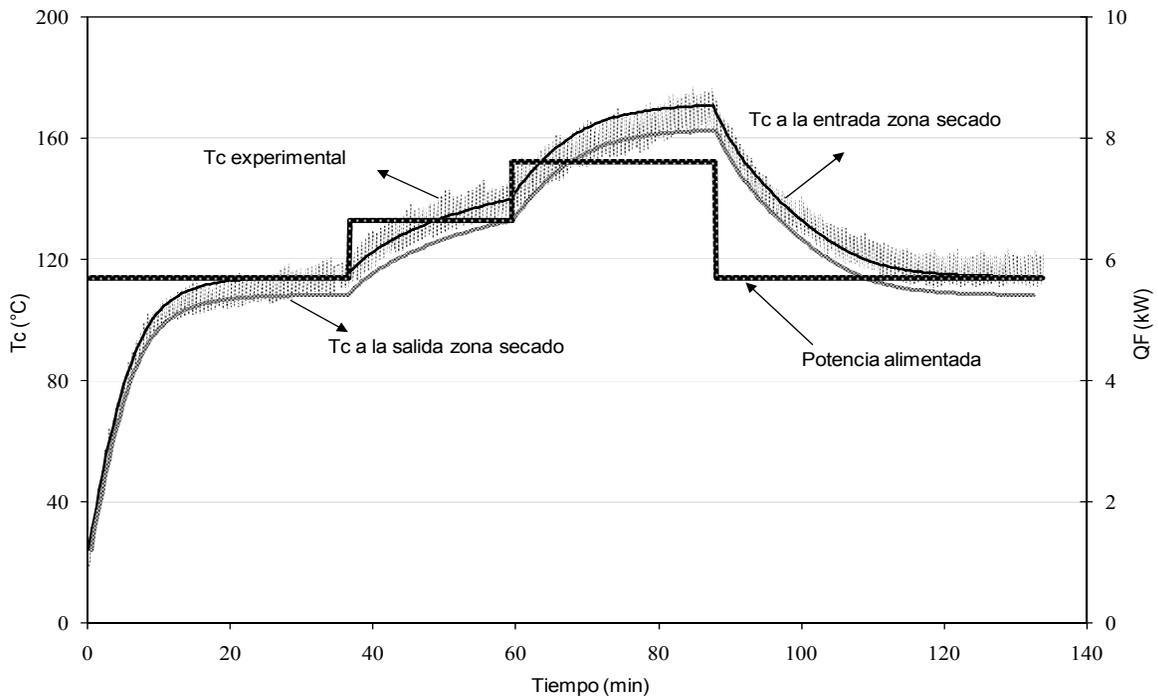


Fig. 9: Perfiles de temperatura del cilindro durante un ensayo con perturbaciones en la potencia de calentamiento.

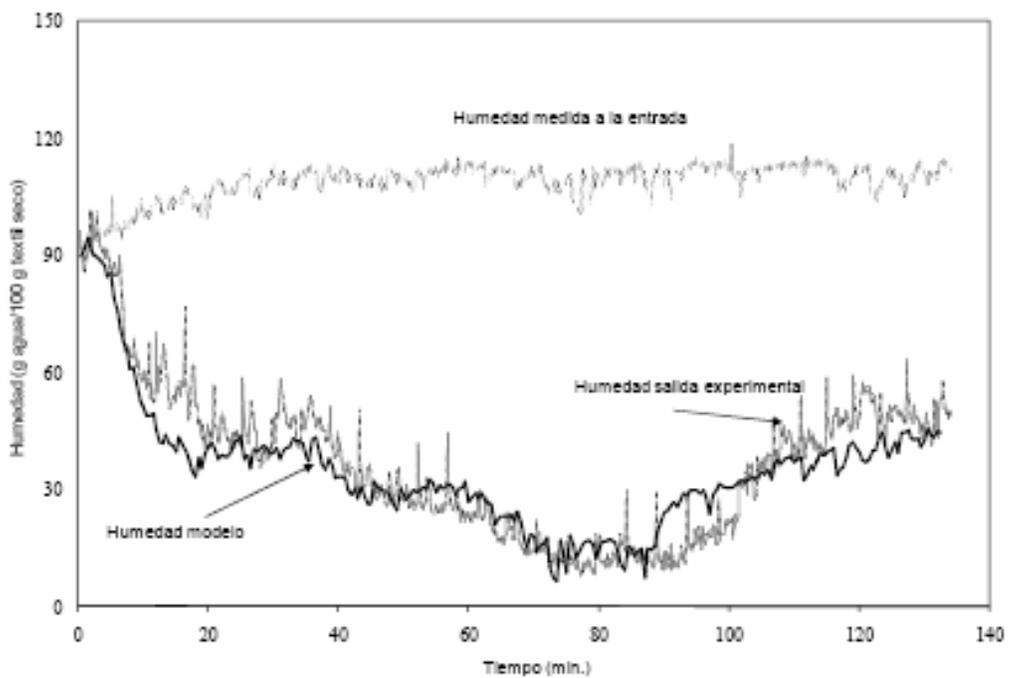


Fig. 10: Perfiles de humedad del textil a la salida durante un ensayo con perturbaciones en la potencia de calentamiento.

CONCLUSIONES

Al estudiar la dinámica térmica del cilindro considerando los procesos de convección y radiación, tanto hacia el ambiente como hacia el interior del cilindro, se evidencia de los resultados, que existe una influencia de la velocidad de rotación. El perfil de temperatura determinado a partir del modelo matemático propuesto para caracterizar la dinámica térmica del cilindro, considerando los procesos de convección y radiación tanto hacia el ambiente como hacia el interior del cilindro, permite obtener temperaturas muy próximas a las experimentales, con una desviación menor a 5%.

El modelo matemático desarrollado para la zona de secado permite predecir la humedad del textil a la salida con porcentajes de desviación cercanos al 10%, respecto a los datos experimentales. En general, el modelo matemático desarrollado para cada una de las cuatro zonas del cilindro (inducción, secado y las dos de enfriamiento), permite determinar valores muy próximos a los experimentales con desviaciones inferiores y cercanas al 10%.

REFERENCIAS

- Dhib, R.; *Infrared Drying, From Process Modeling to Advanced Process Control*, Drying Technology: 25(1), 97-105 (2007)
- Fan J. y X. Wen; *Modeling Heat and Moisture Transfer Through Fibrous Insulation with Phase Change and Mobile Condensate*, International Journal of Heat and Mass Transfer: 45, 4045-4055 (2002)
- Feng, H., J. Tang, R. P. Cavaliere y O. A. Plumb; *Heat and mass transport in microwave drying of porous materials in a spouted bed*, AIChE Journal: 47(7), 1499-1512 (2001)
- Incropera, F. y D. DeWitt; *Fundamentals of heat and mass transfer*, Cuarta Edición, Editorial John Wiley & Sons, EUA (1996).
- Jang, J. Y. e Y. W. Chiu; *Numerical and Experimental Analysis for a Metallic Hollow Cylinder Subject to Step-wise Electro-magnetic Heating*, Applied Thermal Engineering: 27, 1883-1894 (2007)
- Lee, H.S., W. W. Carr, H. W. Beckham y J. Leiden; *A Model of Through-air Drying of Tufted Textile Materials*, International Journal of Heat and Mass Transfer: 45, 357-366 (2002)
- Lu, T. y S.Q. Shen; *Numerical and Experimental Investigation of Paper Drying: Heat and Mass Transfer with Phase Change in Porous Media*, Applied Thermal Engineering: 27, 1248-1258 (2007)
- Pérez, S., y otros cuatro autores; *Modeling and identification of fabrics drying heated cylinder from rotational speed perturbations*, Applied Simulation and Modeling, Proceedings of the IASTED International Conference, 29-35, Marbella Septiembre 9-14, España (2001)