

MODELIZACION FISICO-MATEMATICA DE LAS MAQUINAS DE TINTURA POR AGOTAMIENTO

R. Burley*

0.1. Resumen.

Se estudia el comportamiento tintóreo por agotamiento en máquinas de tintura de bobina axial y radial con/sin flujo inverso. Su objeto es el de llegar a establecer simulaciones realistas que prevean el comportamiento práctico dinámico de tintura de fibras textiles.

Palabras clave: Simulación, máquinas de tintura, agotamiento, bobina axial y radial.

0.2. Summary. PHYSICO-MATHEMATICAL MODELLIZATION OF EXHAUSTION DYEING MACHINES

The exhaustion dyeing behaviour in dyeing machines with axial and radial bobbins with and without reverse flow is studied in this paper. The objective is the establishing of some realistic simulations foreseeing the dynamic practical behaviour of textile fibre dyeing.

Key words: Simulation, dyeing machines, exhaustion, axial and radial bobbin.

0.3. Résumé. MODELISATION PHYSICO-MATHEMATIQUE DES MACHINES DE TEINTURE PAR EPUISEMENT

Nous étudions le comportement tinctorial par épuisement sur des machines de teinture à bobine axiale et radiale avec/sans flux inversé. L'objectif est d'arriver à établir des simulations réalistes qui pourront prévoir le comportement pratique dynamique de la teinture des fibres textiles.

Mots clés: Simulation, machines de teinture, épuisement, bobine axiale et radiale.

1. EL TEÑIDO COMO UN PROBLEMA TECNICO DE PROCEDIMIENTO

En una máquina de teñir se hace circular un fluido caliente que contiene colorantes y otros productos químicos a través de las fibras, reunidas en diversas formas de bobinas de fibras. A lo largo de las distintas etapas del ciclo de tintura, y gracias al flujo de fluido, se suministran y se eliminan energía térmica y sustancias químicas de las fibras individuales.

Normalmente el proceso de tintura se controla mediante la velocidad de aumento de temperatura, lo que nos conduce al concepto de "agotamiento" del colorante hacia las fibras a velocidades concretas durante un período de tiempo. El éxito de un colorante determinado depende de la alteración de la velocidad según el procedimiento físico de absorción del colorante (que cambia para cada sistema tinte/fibra), de manera que finalmente se alcanza una división equilibrada del colorante entre la fibra y el baño de colorante, conocida como colorante "uniforme". La redistribución del colorante en la fibra se denomina "igualación" de un color.

El teñido, en términos químicos y de técnicas de procedimiento, es un proceso de lecho fluido, y tiene mucho en común con la adsorción continua y la limpieza de gas. Con el objeto de hacer una descripción matemática, la máquina de teñir puede ser considerada como un reactor de lecho fluido de bobinas conectado con un depósito de mezcla, de tal manera que el fluido circula, en un circuito cerrado, de una parte a otra del procedimiento. Para una descripción, diseño y control eficaces de una máquina de teñir, se deben de satisfacer los siguientes requisitos:

1. El comportamiento del fluido y del material de transporte en la máquina debe de ser susceptible de ser matemáticamente descrito.

2. La descripción debe de incluir expresiones para la velocidad de teñido y nivelación en cualquier momento para un sistema de tinte/fibra determinado dentro del lecho de bobinas.

3. El grado de sensibilidad de diversos parámetros de control en relación a la temperatura, el pH y la velocidad de flujo debe de ser conocido.

4. Las funciones matemáticas de concentración de colorante son necesarias para su uso como parámetros de control para la tintura.

5. Con objeto de realizar simulaciones realistas, los conocimientos experimentales de los

* Roger Burley, D.Eng, PhD, BSc, CEng, FIChemE, CCol, FSDC. Heriot-Watt University, Departamento de Ingeniería Química, Riccarton, Edimburgo, Escocia EH14 4AS.

intervalos de tiempo transcurridos entre el lecho de bobinas y el depósito de mezcla deberían de conocerse.

2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION

El informe estudia el comportamiento de los siguientes tipos de maquinaria de tintura:

1. Maquinaria de tintura de bobina axial con/ sin flujo inverso.

2. Maquinaria de tintura de bobina radial con/ sin flujo inverso.

Los métodos considerados se muestran en los gráficos 1 y 2. El tipo de funcionamiento de la máquina se describe combinando un conocimiento de los procesos de adsorción en la superficie de contacto colorante/fibra con una descripción matemática del comportamiento del flujo de fluido en la máquina.

Se trata de presentar el papel que juega el fluido en varios procesos de transporte de masa complejos y simultáneos de adsorción de sólido, o como funciones de tiempo y posición. La aplicación del ordenador ofreció la salida gráfica y numérica de la variación en la concentración de colorante en la fibra indicando el tiempo, describiendo así el comportamiento de la máquina de teñir.

La simulación del efecto que ejercen estos procesos en los índices respectivos de las fases sólidas y fluídas, permitió una mejor comprensión del comportamiento dinámico de la máquina, con repercusiones directas para la aplicación del control directo.

Con la implantación de micro-ordenadores y micro-procesadores, es importante ser capaz de describir de forma dinámica el proceso de tintura a controlar, para así maximizar el potencial de esta nueva tecnología en la industria textil. En el futuro, con una aplicación adecuada de los micro-procesadores a las máquinas de teñido en bobinas de control directo de fibras textiles, es posible que se pueda prever una tintorería con un número de máquinas controladas desde una única mesa de control, a diferencia de la actual operación con una sola máquina; poniendo al día de esta manera la tecnología de la aplicación de materias colorantes con otros muchos procesos similares en las industrias químicas y de transformación.

3. DESCRIPCION DEL PROCEDIMIENTO

El teñido en bobinas de las fibras con forma de "material suelto", "cono" o "queso" es un área en importante desarrollo dentro de la industria de tintura de fibras. Todas ellas constituyen un tipo de lecho de bobinas de fibras.

Normalmente uno no se interesa demasiado por lo que pasa con el producto adsorbido de bobinas convencional, por lo que el problema de la tintura a gran escala se considera poco común.

Se ha descrito con todo detalle en otro lugar (6) el modelo físico empleado para describir el transporte y los procesos de las reacciones químicas que tienen lugar en un lecho de bobinas de fibras.

De todas formas, se suministra una breve descripción del modelo para la comprensión de los datos presentes en los procesos considerados.

4. FORMULACION MATEMATICA

Cuando un fluido fluye en un lecho de bobinas entran en juego dos fenómenos de flujo; los conocidos como flujo de volumen y flujo dispersivo.

Por el colorante adsorbido en las fibras se puede considerar a θ como una concentración de emplazamiento saturado alto; donde no toda la superficie es igualmente válida para la adsorción.

$$T_a = K_a C (\theta^* - \theta) \quad (1)$$

Se considera que el coeficiente de desorción es directamente proporcional a la concentración de colorante en las fibras:

$$v_b = K_b \theta \quad (2)$$

Debe de tenerse en cuenta el hecho de que un lecho de bobinas fibrosa contiene además de material sólido, material fluido en los espacios vacíos. Por lo tanto, todos los términos relacionados incluirán un coeficiente de porosidad, ϵ .

El desarrollo conduce a una demostración global del modelo para la acumulación de estado irregular del tinte, C_p , en la fase sólida en un punto (x,t) dentro de la cama de bobinas.

Para la fase fluída:

$$\epsilon \frac{\partial C_t}{\partial t} = \epsilon U \frac{\partial C_t}{\partial x} - \epsilon D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + (1 - \epsilon) K_a (\theta^* - \theta) C_t - \epsilon K_d \theta \quad (3)$$

Para la fase sólida:

$$(1 - \epsilon) \frac{\partial \theta}{\partial t} = (1 - \epsilon) K_a (\theta^* - \theta) C_t - \epsilon K_d \theta \quad (4)$$

5. MODELO 1: SISTEMA AXIAL CON DEPOSITO DE MEZCLA

Los supuestos básicos establecidos referentes a los procesos físicos implicados en la maquinaria de teñido de bobinas son los siguientes:

1. El coeficiente de dispersión no depende ni de la concentración ni de la posición de la velocidad

de flujo (ecuación 1).

2. La variación en la concentración a través de un diámetro dado para una muestra representativa dada es insignificante (despreciable).

3. Las velocidades de adsorción y desorción siguen las ecuaciones de las velocidades dadas, es decir las ecuaciones (1) y (2).

4. El líquido libre en el depósito de mezcla está perfectamente mezclado.

5. Se tiene en cuenta la re-circulación de la solución de tintura desde el depósito de mezcla y hacia él, por medio de la función de retraso de tiempo t_1 y t_2 . Las adiciones de tinte pueden simularse gracias a una función de concentración auxiliar $S(t)$. Se supone que esta adición de colorante se hace en un depósito de baño desocupado.

6. EL DEPOSITO DE MEZCLA

Se supone que el líquido del lecho de bobinas se mezcla perfectamente y de forma inmediata en el depósito de mezcla con la solución que hay allí, de forma que la concentración de fluido en el depósito C_r es equivalente a la concentración de salida de fluido del depósito. Por lo que:

$$v \frac{\partial C}{\partial t} = Q_{in} C_{en} - Q_{sal} C_r + F(S(t)) \quad (5)$$

donde $S(t)$ es una función de entrada de concentración auxiliar definida. Hay que tener en cuenta cualquier función de la variable tiempo de la adición o eliminación de colorante auxiliar a una velocidad de flujo dada, F . También se determina la velocidad de cambio en el volumen de la solución libre en el depósito de mezcla.

$$dv/dt = Q_{ent} - Q_{sal} \quad (6)$$

En conjunto, podemos representar la variación en la concentración de fluido en el depósito de mezcla como sigue:

$$\frac{dC_r}{dt} (Q_{ent} - Q_{sal})/t = Q_{ent} C_{ent} - Q_{sal} C_r + F.S(t) \quad (7)$$

7. CONDICIONES LIMITE

La solución de las ecuaciones necesita unas condiciones límite apropiadas. Las conocidísimas condiciones límite de Danckwert 12 para el caso axial determinan que si la concentración de la fase fluida en la entrada justo debajo de la salida es $C(1,0-)$, la concentración justo dentro de la entrada al lecho de bobinas será menor que $C(1,0+)$, debido a la dispersión en la dirección axial, lo que nos da:

$$V(C_r - C_{ent}) = D \frac{\partial C}{\partial X}, X=Q \quad (8)$$

y debido a la continuidad de la masa a través del límite también se puede escribir:

$$V(C_r - C_{sa}) = D \frac{\partial C}{\partial X}, X=L \quad (9)$$

Se especifican los valores iniciales de la concentración de tinte en las fases sólida y fluida y para p tras constantes definidas, para cada simulación.

$$VC_r - VC_{sa} = D \frac{\partial C}{\partial X} v = 0, X=L \quad (10)$$

8. MODELO 2: SISTEMA RADIAL DE RE-CIRCULACION CON DEPOSITO DE MEZCLA

En el Gráfico 2 se muestra un sistema de teñido de bobinas radial, en el que el flujo se encuentra en cualquier dirección radial. La disposición física del lecho fijo nos conduce a ciertas características de funcionamiento que son bastante distintas a las que se dan en un reactor de flujo axial. Las dos diferencias más relevantes son:

1. Velocidades superficiales menores para una base y una velocidad de flujo dadas: velocidad superficial variable contra constante en la dirección de flujo: (inversamente proporcional a la distancia radial).

2. Esta velocidad variable en la dirección del flujo radial afectará al transporte de masa entre la bobina de sólidos y fluidos, y además cambia también las características de dispersión del fluido en la base, i.e.

$$D = f(V_r, v) \quad (11)$$

Para formular el problema se hacen los siguientes supuestos:

1. La bajada de presión desde el núcleo central hacia la periferia es constante en todas las secciones transversales.

2. No se tiene en cuenta el efecto de la variación de la velocidad radial en los índices de adsorción empírica.

3. Los efectos de la dispersión se representan por medio de un coeficiente de dispersión constante en la dirección del flujo. Dicho coeficiente es independiente de la velocidad local.

4. A pesar de que existen espacios de canalización, de desviación y espacios desconectados, estos no son tenidos en cuenta.

5. Para este problema, las condiciones límite son del tipo de Danckwerts, como en el caso axial: ecuación (11).

Haciendo uso de los argumentos previos obtenemos lo siguiente:

$$\varepsilon \frac{\partial c_t}{\partial t} = \varepsilon D \cdot \left[d^2 c / dr^2 + 1/r \partial c / \partial r \right] \pm V dc/dr - (1-\varepsilon) \partial \theta / dr \quad (12)$$

El signo negativo del término de flujo pistón hace referencia al flujo exterior o de ida. Para el flujo interior hay que añadir un signo positivo.

Las condiciones límite en el punto de entrada radial a la base son parecidas a las que se dan en el caso axial:

$$V (C_{ent} - C_t) = \varepsilon \left[\frac{\partial C}{\partial r} \right]_{T_{ent}} \quad (13)$$

La condición límite de salida es del mismo tipo que en el caso axial, ecuación (11).

Las concentraciones de colorante iniciales en el flujo de bobinas son las siguientes:

$$C(0, v) = 0; v_{ent} \leq v \leq v_{sal} \quad (14)$$

La concentración de la solución de tintura en la entrada de la base proveniente del depósito de mezcla en un tiempo t , siendo C_t la concentración de la solución de tintura del depósito se determina de la siguiente forma:

$$C(t, v_1) = C_T, T \geq 0 \quad (15)$$

Las ecuaciones que determinan la adsorción de colorante en la superficie de la fibra es la misma que en el modelo axial [ecuación (8)].

Las ecuaciones son susceptibles de proporcionar una solución simultánea para explicar el comportamiento dinámico de los sistemas para las condiciones dadas de los parámetros de velocidad de flujo y tintura. Los métodos exactos han sido descritos con detalle en una publicación previa⁶⁾ o también se puede consultar la tesis original para así tener información adicional¹³⁾.

Los resultados de este tipo de simulación dan las curvas de "agotamiento" dinámico. Además, el análisis hace la importante observación de que la curva de agotamiento depende de la posición y de la máquina, como se muestra en el Gráfico 7. Las curvas también son susceptibles de ser utilizadas para cualquier regresión polinomial o exponencial conveniente, lo que constituye el tema de numerosas investigaciones y discusiones que se están llevando a cabo en la actualidad¹⁷⁻²⁰⁾.

9. VALORES DE LOS PARAMETROS

La lista de los valores de los distintos parámetros estudiados, tomada de distintas fuentes de referencia, puede verse en las tablas referidas en el Cuadro 2.

Es necesario ampliar el trabajo en este área para que la simulación del proceso de este tipo de equipo pueda ser aplicada con toda confianza.

10. RESULTADOS Y OBSERVACIONES

10.1. Perfil de la concentración de fluido dentro de la bobina -flujo axial

La concentración de la solución de tintura al comienzo de la bobina aumenta rápidamente hasta alcanzar la misma concentración de entrada de tinte proveniente del depósito de mezcla.

En relación al Gráfico 3, la concentración de tinte en la entrada de la base disminuye gradualmente hasta llegar a 0.4 unidades. Ya que la concentración de salida desde la base hacia el depósito de mezcla actúa como un disolvente para el depósito de mezcla; la concentración de salida del depósito de mezcla es menor.

La concentración de salida desde la base empieza a aumentar a aproximadamente 1.15 unidades temporales no dimensionales, y alcanza la misma concentración que la concentración de salida del depósito de mezcla (una línea continua) a 1.6 unidades no dimensionales. Al llegar a este punto, la concentración de colorante en la base llega al máximo, porque simultáneamente se ha llegado al máximo de la capacidad de adsorción de la fibra para el colorante.

En ese momento la concentración de salida desde el lecho de bobinas aumenta y provoca el que finalmente la concentración de salida del lecho de bobinas empiece a incrementarse de nuevo a aproximadamente 2,1 unidades temporales no dimensionales. Esto continúa/se prolonga hasta que se alcanza el equilibrio, a aproximadamente 2.7 unidades temporales no dimensionales.

Este comportamiento oscilante de la concentración de fluido va disminuyendo gradualmente y alcanza un estado de equilibrio final a aproximadamente 32 unidades de concentración, lo que representa el reparto final de tinte entre la fibra y la solución.

10.2. Perfil de concentración dinámica en la fibra-flujo axial

La adsorción de tinte en la bobina de las fibras depende en gran medida de la disponibilidad de la solución de tinte y de las constantes de la velocidad de adsorción para un sistema tinte/fibra determinado.

En esta simulación, las velocidades de adsorción y desorción son de 1 cm³ sec⁻¹ y 0.01 sec⁻¹ respectivamente. La velocidad de adsorción depende de la concentración del baño como se muestra en el Gráfico 4, donde se traza el perfil de concentración en relación a la distancia a lo largo de la bobina usando como parámetro el tiempo. A 1.34 unidades temporales no dimensionales (curva superior), la concentración de la solución de tintura

en la primera mitad de la bobina es mayor que la de la segunda parte, donde la concentración de fluido máxima se encuentra aproximadamente a medio camino de la bobina.

Esta constituye la primera "onda" de concentración a través del sistema. En este momento la zona de adsorción activa se sitúa en la segunda parte de la base. Al mismo tiempo la dispersión y el incremento del flujo de convección incrementa la concentración de fluido en la posición lejana en el flujo de fluido para intensificar el proceso de adsorción.

10.3. Efecto del cambio de la dirección de flujo en una máquina de flujo axial

Una bobina necesitará más tiempo para alcanzar el equilibrio bajo circunstancias de flujo uniaxial, en comparación con un sistema de operación de flujo inverso.

Se simuló esta condición utilizando unos criterios especiales para cambiar la dirección del flujo.

Cuando al principio de la base, la velocidad de cambio de la concentración con respecto al tiempo ($x=1$) era inferior a 0.0001 unidades (concentración/tiempo), se cambiaba la dirección del flujo.

Para un caso dado, como se puede apreciar en el Gráfico 5, el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio con o sin inversión del flujo era de 70.1 y 93.32 unidades temporales no dimensionales. Se comprobó que la inversión del flujo ahorra hasta un 24,88 % en el tiempo de transformación, mientras que incrementaba el valor de adsorción de equilibrio del colorante en la fibra de un 0.7136 a un 0.7375 (i.e. un incremento del 2,39%) como se muestra en el Gráfico 6.

10.4. Simulación de los efectos producidos en la velocidad de tintura a través de la introducción de una entrada auxiliar, $F(t)$ en el depósito de mezclas.

Si miramos atentamente el proceso podemos ver que la concentración de la solución de colorante juega un papel fundamental en el proceso de adsorción, [ecuación (5)]. En las mismas condiciones de las variables dadas, cuanto más alta es la concentración de la solución de tintura más rápidamente se absorbe el colorante en las fibras.

Este estudio simuló una operación a través de un reciclado cerrado donde el volumen de líquido libre se mantenía al mínimo. Las ventajas de llevar a cabo este proceso con tan mínima cantidad de

líquido libre como sea posible, se traducen en un ahorro de tiempo, colorantes y productos químicos auxiliares.

Inicialmente las fibras absorben rápidamente el colorante, de ahí que la concentración de líquido libre disminuya drásticamente. Al mismo tiempo, el ritmo de tintura también disminuye debido a la baja concentración de colorante. Una manera de superar el funcionamiento de este proceso consiste en introducir una entrada auxiliar en el depósito de mezclas, esto es, añadir líquido colorante como función de tiempo.

Cuando la concentración de la solución empieza a disminuir en la entrada al comienzo del proceso, se puede introducir en el volumen de líquido libre una función de entrada específica.

En la simulación se escribió una subrutina que representa la entrada auxiliar. Esta entrada se introducía en el momento en que la velocidad de cambio de la concentración de la solución se volvía negativa al principio del lecho.

$$\partial c/\partial t < 0, \bar{x} = 0; T > 0 \quad (16)$$

Las dos entradas auxiliares utilizadas en este estudio son entradas graduales y exponenciales. Los efectos producidos por estas entradas en el proceso del teñido en bobinas se pueden ver claramente en los Gráficos 8 y 9.

En el primer caso, el poder de adsorción comienza en una unidad temporal no dimensional (tiempo de residencia). La concentración de fluido dentro de las bobinas tiene un valor mínimo, después se va añadiendo gradualmente colorante concentración inicial. Un incremento progresivo de la concentración de colorante permite alcanzar un valor de 0.14 al cabo de tres unidades temporales no dimensionales, y un valor de 0.11 sin la entrada auxiliar. Ambos valores se obtienen en el punto medio del lecho. Así es como se obtiene un incremento de un 27,27% en el colorante absorbido en un momento dado.

La ventaja más significativa reside en la reducción del tiempo de tintura de 72,04 a 35,35 unidades temporales no dimensionales, una disminución neta de 50,93% del tiempo inicial de transformación.

En el segundo caso, Gráfico 10, se utilizó una función de incremento exponencial. La fórmula es la siguiente:

$$\bar{C}_{AUX} = C_{max} \exp[1 - \exp(-t)] \quad (17)$$

Inicialmente la concentración de la función de entrada crece progresivamente $\bar{C}_{AUX}/C_{max} \geq 1$. La concentración del baño se incrementa entonces de forma gradual desde un punto mínimo para conseguir un valor mayor en la concentración de

colorante absorbido. Este sistema redujo asimismo el tiempo de equilibrio a 37,63 unidades temporales no dimensionales, el cual es un 6,45% mayor que el tiempo que transcurre al utilizar la función de entrada gradual.

En el proceso real la segunda función de entrada proporciona un trampolín para conseguir mejorar y controlar las actuales máquinas de teñido en bobinas y una manera de alterar la curva de agotamiento mediante otros medios que no sean el pH y la temperatura.

10.5. El efecto que produce en la dinámica de transformación la relación radio interior/ radio exterior de un reactor radial

El espesor de las bobinas en un reactor radial será menor que en el caso de un reactor de flujo axial, tal y como se puede ver en los Gráficos 1 y 2. Para variar lo menos posible los parámetros anteriores, elegimos un reactor con un radio externo fijo, luego procedimos a variar el radio interno r_1 , y la altura del reactor. Esto significaba que cuanto más fino era el lecho más largo era el volumen fijo de las bobinas. Cuando se incrementaba el radio interno, disminuía la diferencia entre las velocidades interna y externa y la relación de aspecto r_1/r_2 se aproximaba a 1.

El programa de simulación de un modelo de flujo radial fue desarrollado a partir de un modelo de flujo axial. Puesto que la velocidad de caída varía a lo largo de todo el reactor radial, si lo comparamos con un reactor axial, decidimos cambiar la entrada inicial de datos de la velocidad de caída por una velocidad de caída media.

Para ello utilizamos un coeficiente de dispersión radial de un sólo valor. Dadas las características geométricas especiales que presenta un reactor radial, teníamos que introducir algún tipo de aproximación para determinar la velocidad de caída media a lo largo de todo el reactor radial. Los criterios de cálculo que utilizamos fueron los aritméticos:

Establecimos las velocidades interna y externa de una velocidad de caída media de entrada dada:

$$V_{med} = [V_1 + V_2] / 2 \quad (18)$$

Para la velocidad de caída interna V_1 ,

$$V_1 = \frac{2V}{(1 + v_1/v_2)} \quad (19)$$

y la velocidad de caída externa V_2 ,

$$V_2 = V_1 (v_1/v_2)$$

10.6. Simulación comparativa: flujo radial/axial

En este caso, Tabla 1, disminuimos proporcionalmente el grosor del reactor radial de 6,975 cm a 0,735 cm. El mayor ahorro de tiempo de transformación se produjo al incrementar el radio interno de 0,3575 cm a 1 cm (en un 116,7%), lo cual disminuyó el tiempo de equilibrio de 34,12 a 12,44 unidades temporales (en un 174%). Esta brusca disminución del tiempo de equilibrio indicaba que la relación de aspecto r_1/r_2 , por debajo de 0,14 es el límite de una operación de transformación razonable.

El efecto más significativo de esta relación se halla en valores por debajo de 0,5 que se traduce en una disminución del tiempo de equilibrio a medida que la relación de aspecto se incrementa de 0,5 a 0,05. Se podría reducir aún más el grosor del lecho pero con ello disminuiría la relativa magnitud de ahorro de tiempo de equilibrio. Cuanto mayor es la relación de aspecto más fino será el grosor del reactor. Esto es consecuencia de un bajo índice de concentración en todas las bobinas, lo cual produce una distribución más uniforme del colorante. En vista de los resultados, Gráfico 11, se debería de emplear el valor de la relación de aspecto entre 0,3 hasta 0,5 dado que permite una capacidad máxima de tintura en un tiempo de transformación razonablemente corto.

Hasta qué punto se puede aplicar esto a la práctica dependerá de muchos factores que tienen que ver con el diseño y el manejo de las bobinas como parte de un sistema global continuo.

10.7. Comparación del comportamiento dinámico de los reactores de flujo axiales y radiales

Las características de mezcla en un lecho de bobinas radial presentan una enorme diferencia cuando se comparan con la dinámica de transformación de los reactores axiales. Los resultados obtenidos permiten un tiempo de ruptura más corto en un reactor radial, lo cual se traduce en una disminución de hasta un 10,7% del tiempo de tintura. El tiempo transcurrido hasta alcanzar el equilibrio, dado en la Tabla 1, también ha disminuido en un 41%. Al principio del lecho, en el caso que nos ocupa, tanto en los casos axiales como radiales, de adsorción del tinte por las fibras abarca aproximadamente la misma cantidad de tiempo, no obstante, en la sección central del lecho, en el caso axial, la ruptura comenzó al cabo de 2,79 unidades temporales y terminó al cabo de 6,98 unidades temporales. En el caso radial, la ruptura comenzó en 1,74 unidades temporales hasta 5,43 unidades de ruptura. En el caso radial, el equilibrio se alcanzó aproximadamente en la mitad del tiempo que en el caso axial.

10.8. Variación de los tiempos de tintura

A partir de los resultados de las simulaciones podemos ver que los tiempos del proceso de tintura se pueden variar de distintas maneras:

1. La inversión del flujo del fluido mantiene la concentración en su fase fluída a lo largo de todas las bobinas. Esto permite una mejor igualación de la absorción del colorante a lo largo o ancho de las bobinas e incrementa la velocidad de adsorción hacia la salida del lecho.

2. La conocida importancia de la concentración de la solución en la velocidad de adsorción se confirmó en los resultados de la simulación. Se pudo ver que la velocidad de adsorción es muy sensible al cambio en la concentración de colorante en la fase fluída. Cuanto más alta es la concentración de la solución de tintura, más corto es el tiempo de transformación.

3. Se ha comprobado que resulta efectivo añadir solución de tintura durante el proceso, si bien se debería determinar cual es la función de adición más adecuada, $S(t)$ para cada sistema específico.

4. En el experimento que realizamos para investigar el efecto de la velocidad sobre el coeficiente de dispersión, descubrimos que a una velocidad intersticial baja, la velocidad de tintura se veía muy afectada por una pequeña variación de flujo: se tuvo que emplear una velocidad crítica para minimizar este efecto. Como consecuencia, cualquier máquina de tintura ha de estar diseñada para emplear velocidades de flujo compatibles con el sistema de tintura/fibra de manera que cualquier variación diaria que se produzca en las condiciones del proceso tenga un efecto mínimo en los tiempos de tintura.

11. CONCLUSIONES

Es posible introducir mejoras sustanciales para disminuir al mínimo los tiempos de tintura; éstas incluyen las siguientes:

11.1. Utilización de una velocidad adecuada para la distribución uniforme del colorante a lo largo de las bobinas, consiguiendo así un mejorar la velocidad del excedente global.

11.2. Introduucción de una entrada auxiliar de la disolución de colorante en un tiempo real. Puesto que la mayoría de los procesos de absorción dependen de la concentración de colorante, la reducción de la concentración de colorante dentro de un sistema de circulación cerrado puede resolverse parcialmente adiciones programadas mediante bombas de medición.

11.3. Utilización de colorantes cuyas proporciones de velocidad de adsorción a desorción bajas efectivas puedan alcanzar un valor de saturación más alto, tal y como apuntó Burley con anterioridad, mediante el uso de una máquina de

flujo radial.

Es el caso de un reactor y una presión de goteo dados, normalmente resulta más barato construir un reactor de menor diámetro pero de mayor longitud, en vez de un equipo de mayor diámetro pero con un flujo axial más corto.

11.4. El bombeo inicial y la consiguiente nivelación de colorante dentro de la bobina se puede mejorar invirtiendo la dirección del flujo del fluido, mientras que la ejecución del proceso de tintura en un sistema radial lleva consigo una mejor nivelación a lo largo de todas las bobinas.

12. COMENTARIO FINAL

En cierta medida el estudio del control de la tintura y del baño de colorante ha llegado a una situación interesante. Por un lado, los químicos que estudian el color continúan investigando para encontrar la curva de "agotamiento" última mediante la consideración de la temperatura como una función de concentración de baño de colorante. Esta curva se obtiene de resultados experimentales y luego se utiliza invertida como un parámetro de control para una determinada máquina de tintura que puede derivar en la obtención de colorantes reproducibles.

Por otro lado, el método que nosotros hemos seguido es más general y considera únicamente las ecuaciones dinámicas básicas que describen el comportamiento global de la máquina de tefir. Estas ecuaciones no siguen el modelo de una curva de equilibrio global, la cual se utiliza después como un parámetro de control.

En esta simulación no todas las variables han sido explicadas totalmente. Se puede añadir un mayor perfeccionamiento en lo que respecta al efecto que produce el pH, la adición caústica y la concentración de iones de cloruro así como la temperatura, T , en K_a , K_b , y e , junto con el efecto que produce la velocidad en el coeficiente de dispersión, D .

Asimismo, una vez que se conocen las relaciones correctas entre la temperatura, el pH, la velocidad de tintura, etc. no debería haber ningún problema a la hora de aplicar esto al programa de simulación.

Los resultados de este estudio proporcionan curvas de "agotamiento" reales, exactas y puntuales para una determinada tintura con parámetros conocidos. El problema actual de los métodos alternativos se halla en el hecho de que se utiliza una curva de agotamiento "en equilibrio" cuando estamos tratando con un sistema dinámico cuya posición de equilibrio en cualquier momento se controla termodinámicamente.

No cabe duda de que cuando se encuentre una información más precisa al respecto, se podrán conseguir máquinas de tefir simples y tintorerías.

13. BIBLIOGRAFIA

1. Burley R., Flower J.R. & Ratee I D, JSDC, 85-187 (1969).
2. Burley R., J. Text Inst., 7 (1), 8-17 (1980).
3. Burley R., Flower J R, & Rattee ID, Simulation, 19-200 (1972).
4. Burley R., Text Inst & Ind. 9(8), 226-228 (1971).
5. Burley R. & Hill R.G., JSDC, 92, 181-186 (1976).
6. Burley R., Wai P-C & McGuire G., Applied Mathematical Modelling 9, 33-39, Feb (1985).
7. Ren J., PhD Thesis University of Leeds, Department Colour Chemistry (1985).
8. Chandresakhar S., Reviews of Modern Physics, 15(1) (1943).
9. Levenspeil O., Chemical Reaction Engineering, Cap (Wiley International) (1966).
10. Carberry, J.J. and Bretton, R.H., AIChE, 4: 3 (1958).
11. Vickerstaff, T., Physical Chemistry of Dyeing Tanning (Oliver & Boyd), 2nd Edition (1950).
12. Danckwerts, P.V., Chem Eng Science, 2(1); 1-13 (1953)..
13. Wai, P.C., PhD Thesis, (Dept of Chemical and P. Engineering, Heriot-Watt University, Edinburgh). (1985).
14. Rattee, I.D. and Breuer, Physical Chemistry of Adsorption (Academic Press).
15. Aris, R. and Amundsen, N.R., AIChEJ 3 (2): 280- (1957).
16. Fahein, R.W. and Smith, J.M., AIChEJ 1:28 (1995).
17. Ergun, S., Chem Eng Prog 48:89 (1952).
18. Cegarra, J., Puente, P. and Valdeperas, J. , JSDC, 331 (1976).
19. Cegarra, J., Puente, P. , Text Res Jnl., 345-35 (1976).
20. Cegarra, J., Puente P. and Valdeperas, J. Chem and Col, 170/23-174-27, Aug. (1974).
21. Hoffmnan, F., and Mueller, P.F., JSDC, 178-186 (1979).
22. Cegarra, J. Fundamentos de la Maquinaria de Tintura, U.P.C., Barcelona, ISBN 84-600-5096-3 (1987).

Trabajo recibido en:1996.09.25.

Aceptado en: 1996.12.09.

ANEXO

NOMENCLATURA:

- $C_i, C_r, C_{ant}, C_{sal}$ Concentraciones , líquido, depósito, entrada salida
- V, V_t Velocidades
- N_{DISP} Flujo dispersivo de mezcla
- r Radio de la bobina
- K_a, K_d Constantes de sorción
- L Largo de lecho
- v_a, v_d Velocidades de sorción
- t Tiempo
- V Volumen
- Q Flujo normal
- F Flujo de tintura auxiliar
- $S(t)$ Concentración auxiliar por entrada
- ϵ Porosidad
- θ, θ^* Concentraciones normal y saturadas en fibras
- D Coeficiente dispersivo

TABLA 1

Diferencia entre flujo axial y radial
 $D=0.04 \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-1}$ $U=1.64 \text{ cm}^1 \text{ sec}^{-1}$ $K_a=1.0 \text{ cm}^3 \text{ gm}^{-1} \text{ sec}^{-1}$

Modelo:	Conc ⁿ (Equil)	Tiempo	Economía
Axial	0.99	21	
Radial (por exterior)	0.99	12.4	41%
Radial (por interior)	0.99	18.03	14%

TABLA 2

Valores típicos de la literatura científica

Variables	Campo de valores	Referencias
$U \text{ cm min}^{-1}$	1-20	1,18
$D_a \text{ cm}^2 \text{ min}^{-1}$	0.1-10	1,15,16
$D_d \text{ cm}^2 \text{ min}^{-1}$	0.01-20	1,15,16
$k_a \text{ cm}^3 \text{ gm}^{-1} \text{ sec}^{-1}$	2.0-0.1	11,14,18-21
$k_d \text{ sec}^{-1}$	0.3-0.003	11,14,18-21

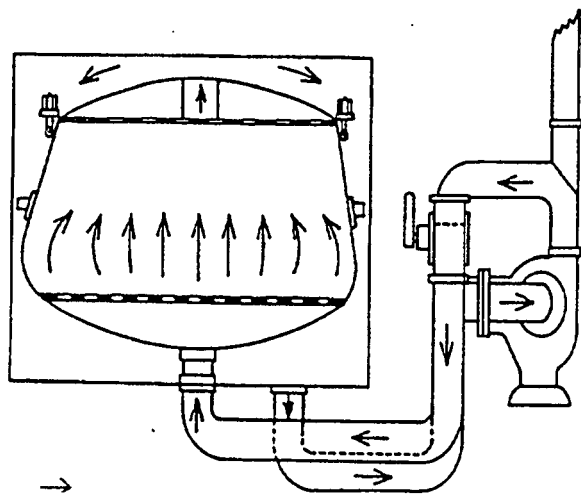


FIGURA 1. Máquina por agotamiento, flujo axial.

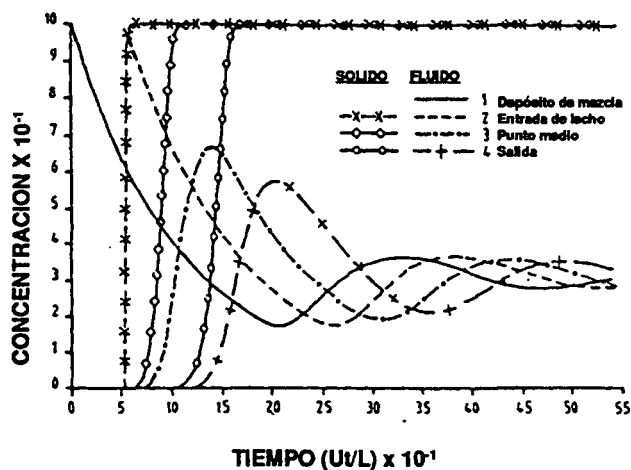


FIGURA 3. Reacción de función de entrada; 1 Depósito de mezcla. 2. Entrada del lecho. 3. Punto medio. 4. Salida.

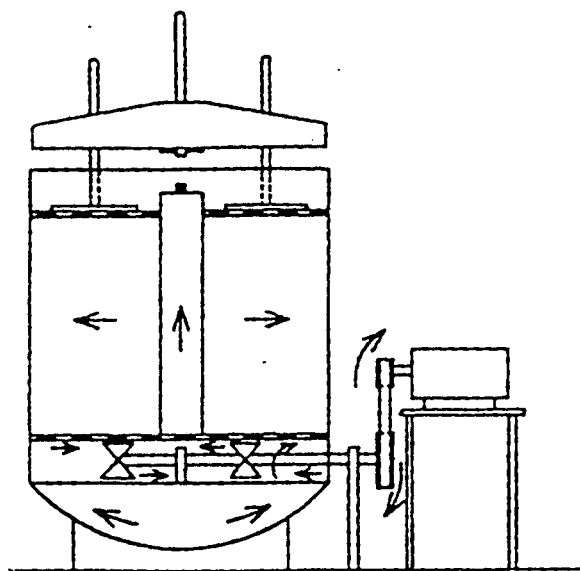


FIGURA 2. Máquina por agotamiento, flujo radial

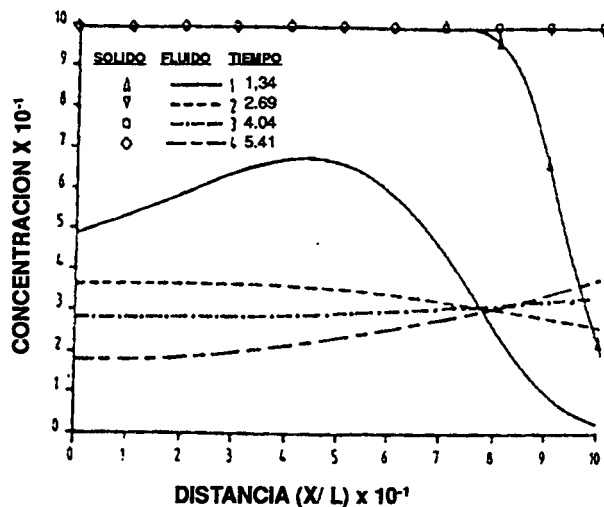


FIGURA 4. Tintura en fibra en función del tiempo: 1. 1.34, 2. 2.69, 3. 4.04, 4. 5.41 (sin dimensiones).

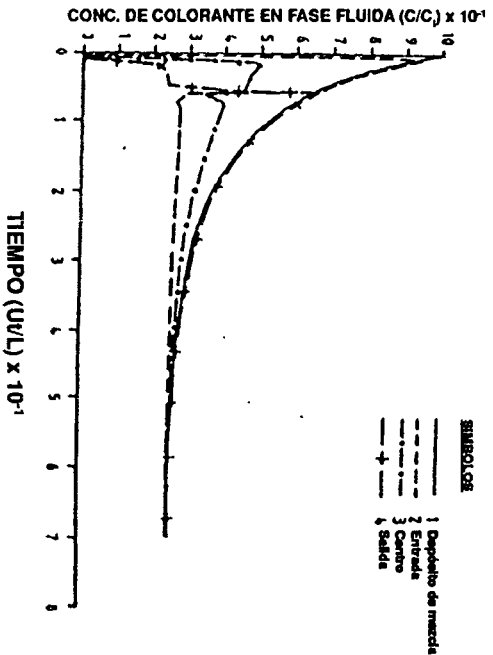


FIGURA 5. Efectivo de cambio en la dirección de flujo; concentración en fase fluida, máquina de flujo axial. 1. Depósito de mezcla, 2. Entrada, 3. Centro, 4. Salida.

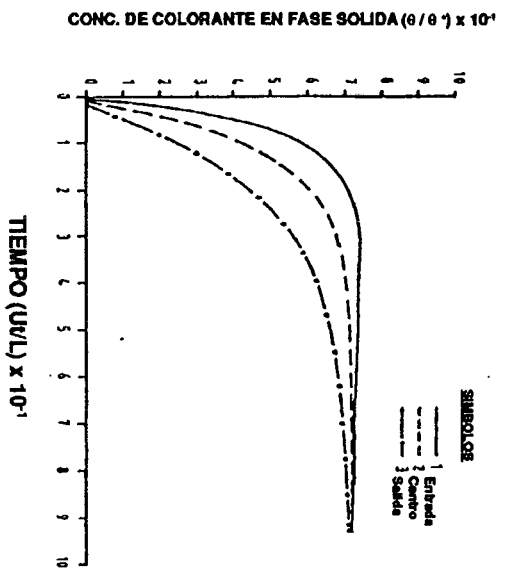


FIGURA 7. Concentración de tintura en función del tiempo: "curvas de agotamiento": 1. Entrada, 2. Centro, 3. Salida.

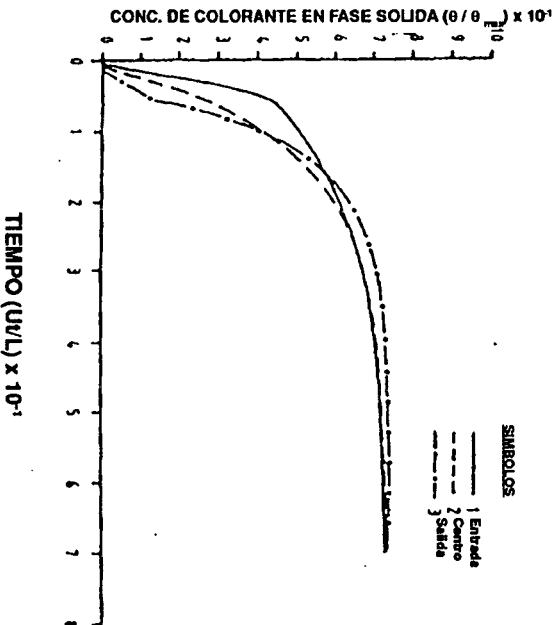


FIGURA 6. Efectivo de cambio en la dirección de flujo; concentración de fase sólida (fibras) 1. Entrada, 2. Centro, 3. Salida.

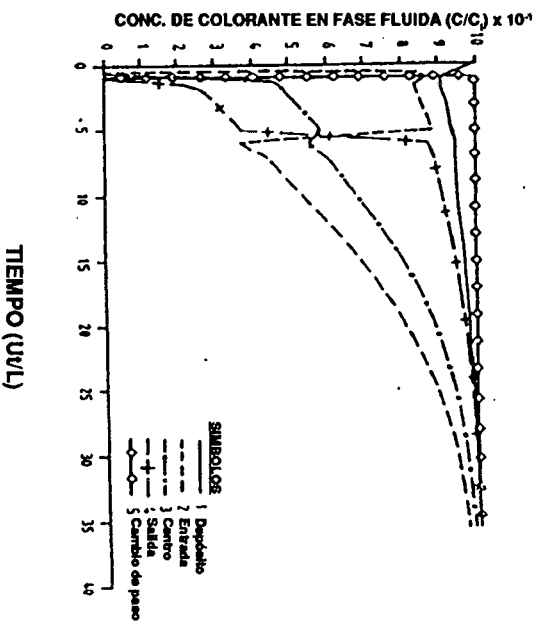


FIGURA 8. Efectivo de un cambio de paso suplementario en el depósito de mezcla. 1. Depósito, 2. Entrada, 3. Centro, r. Salida, 5. Cambio de paso.

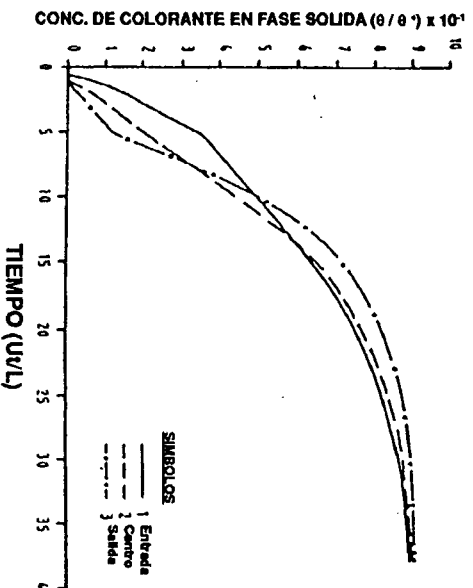
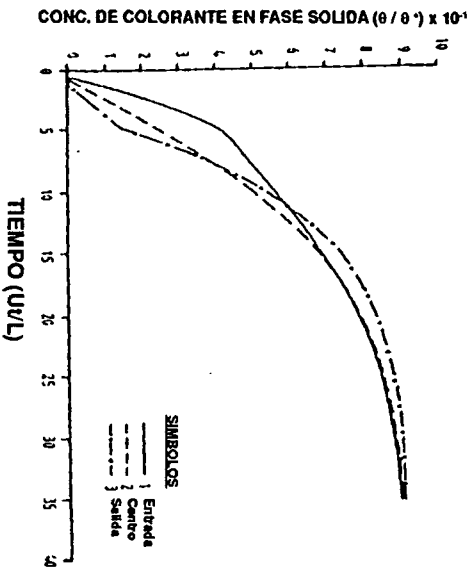


FIGURA 9. Perfil de concentración de tintura en fase sólida (fibras) después de un cambio de paso dentro y dirección de flujo.

FIGURA 10. Concentración de tintura en fase sólida (fibras) con entrada de flujo en forma de ecuación (17).

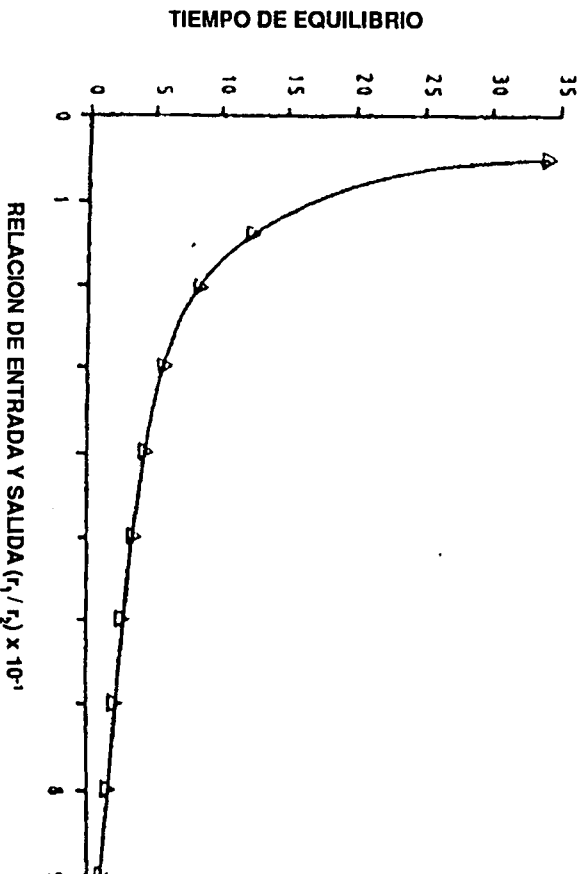


FIGURA 11. Efectivo en tiempo de equilibrio final por la razón (r_1/r_2)

