

MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN SECADERO DE PULPA

Merino Gómez, Alejandro
Centro de Tecnología Azucarera. Universidad de Valladolid
C/ Real de Burgos s/n. Edificio Alfonso VIII. Planta baja. 47011. Valladolid
Teléfono: 983 42 35 63. FAX: 983 42 36 16. Email: alejandro@cta.uva.es

Resumen

En el siguiente artículo se va a mostrar el desarrollo del modelo de un secadero de pulpa de remolacha de la industria azucarera.

Estamos ante un modelo distribuido representado en derivadas parciales. Se muestran los diferentes balances del modelo discretizado y se realizaron unas pruebas del modelo en simulación.

Palabras Clave: Dinámicas de secado, Sistemas distribuidos, balances de materia y energía.

1 INTRODUCCION

Los secaderos son equipos ampliamente utilizados en la industria. El objetivo del secado es eliminar una sustancia líquida de una matriz sólida mediante una evaporación por aporte de calor.

En el caso de los secaderos de pulpa de la industria azucarera se trata de evaporar el agua contenida en la pulpa de remolacha a la que previamente se le ha extraído la sacarosa. Esta pulpa seca es un subproducto de las factorías azucareras y es aprovechada como alimento para el ganado.

El secado de la pulpa es necesario ya que la demanda no es tan elevada como para dar salida a toda la pulpa que se produce en la prensas, por lo que es necesario secarla de tal forma que se pueda almacenar sin que se produzca el deterioro de la misma.

2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

Para llevar a cabo el secado la pulpa prensada esta se pone en contacto con gases calientes, producidos por combustión de gas natural en un hogar situado a la cabeza del secadero. Para llevar a cabo la combustión del gas natural, se utiliza aire que se precalienta haciéndolo pasar por una corona en la que intercambia calor con las paredes que están en con el hogar. Los humos que salen del hogar se mezclan con una corriente de CO₂ para disminuir su temperatura. Los gases que abandonan el secadero se llevan hacia una chimenea. En la 1 se muestra un esquema de la sección de secado.

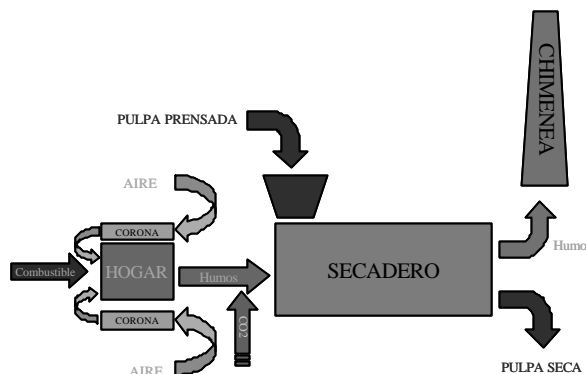


Figura 1. Esquema del secado

La pulpa húmeda se introduce en un extremo del tambor giratorio, cuya configuración facilita el contacto entre la fase líquida y gaseosa, al entrar en contacto la pulpa con el gas caliente la pulpa pierde agua, siendo el mecanismo dominante de transporte la convección gas sólido.

En la figura siguiente se muestra un esquema del secadero:

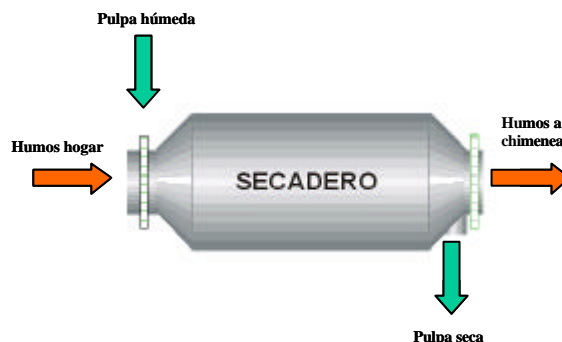


Figura 2. Esquema del secadero.

La pulpa seca pasa a la sección de pelletización donde la pulpa se prepara para servir de alimento al ganado. En la chimenea de escape, unos ciclones recuperan la parte de pulpa que hubiera podido ser arrastrada por los gases de secado.

El tambor rotatorio en el que tiene lugar el secado es un equipo sencillo. El tambor viene equipado con un dispositivo interior para aumentar la transferencia térmica entre los gases de secado y la pulpa. Posee una disposición en forma bandejas en cruz que disgrega el producto en montones individuales, repartidos a lo largo de la sección del tambor (Figura 3). Mediante el giro del tambor estos montones son

removidos y mezclados, permitiendo que se forme una cortina de pulpa que propicia el contacto con los gases de secado [1].

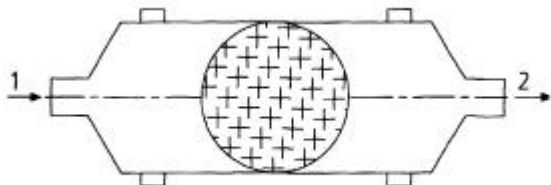


Figura 3. Disposición de las cruces en el interior del secadero

El diseño óptimo de este equipo es muy importante, ya que la humedad de la pulpa a la salida debe permanecer en unos márgenes fijos. Si la pulpa a la salida está demasiado húmeda, se puede producir la putrefacción de la misma durante el almacenamiento, si por el otro lado el secado de la pulpa es excesivo en el interior del secadero, el consumo de combustible aumenta y, en un caso extremo, la total ausencia de agua en la pulpa conlleva que el calor aportado por el gas empieza a comunicarse hacia las paredes del secadero, pudiendo llegar a producirse incendios en el interior del secadero.

3 MODELO MATEMÁTICO

3.1 SUPOSICIONES DE MODELADO

Para el modelado del secadero se han llevado a cabo una serie de suposiciones:

- Se ha considerado que la pulpa está dividida en dos partes. Una parte externa compuesta solamente de agua, desde la que se produce la evaporación hacia la fase gas y otra fase interna desde la que se produce una transferencia de agua hacia la zona externa.
- En la fase sólida sólo se han considerado dos componentes que son la sustancia seca y el agua.
- Se supone una concentración media de agua en el interior de la pulpa. No se considera por tanto el transporte de materia en el interior de la pulpa.
- La pulpa se mueve de manera ideal con flujo de pistón a lo largo de todo el secadero.
- La pulpa se considera de tamaño homogéneo, es decir, no se ha tenido en cuenta una posible distribución de tamaños.
- La fase gaseosa se comporta como un gas ideal.
- La presión es constante en todo el secadero.
- El balance de energía se ha realizado de manera conjunta a toda la pulpa, obviando la distinción que se hizo para el caso de la transferencia de

materia entre zona externa y zona interna. Se supone por tanto que la pulpa tiene una temperatura homogénea.

- Los perfiles en el interior de la pulpa tanto de húmeda como de temperatura son planos.
- La temperatura de la pulpa es homogénea tanto en el interior como en el exterior.
- No se tiene en cuenta la transmisión de calor por radiación en el interior del tambor.
- No se tiene en cuenta la estructura interna del tambor a la hora de realizar el modelo.
- La difusión de agua en el interior del sólido se produce en una sola dirección.
- No se consideran pérdidas de calor.
- No se considera transmisión de calor desde los humos hacia la estructura del tambor.

3.2 SISTEMA DISTRIBUIDO

Dentro del tambor rotatorio las variables del proceso van a variar con el tiempo y a lo largo del secadero estamos, ante un sistema distribuido cuyo modelo viene descrito por ecuaciones en derivadas parciales [8]. Por lo tanto será necesario realizar una discretización de las variables que dependan del tiempo y la distancia. De esta forma el secadero quedará dividido en n zonas dentro de cada una de las cuales se considera que existe mezcla perfecta, es decir, las propiedades a la salida de cada etapa son iguales a las propiedades en el interior de la etapa. Estas zonas estarán interconectadas de tal forma que la salida de una etapa sea la entrada de la etapa siguiente. En el caso del secadero la pulpa y el gas fluyen en corrientes paralelas. En las ecuaciones en las que haya una dependencia de algún parámetro con la distancia en el secadero este aparecerá con el subíndice j que hará referencia a la zona de discretización a la que pertenece. Esta discretización se ha realizado mediante el método de las líneas [10], [12]. Para más información sobre la discretización puede consultarse [5].

3.3 TRATAMIENTO DE LA FASE SÓLIDA

La fase sólida está compuesta por la pulpa, proveniente de las cosetas agotadas que salen del difusor. Esta pulpa no presenta un tamaño uniforme, ya que las cortadoras de cosetas no proporcionan un tamaño único, sino que está comprendido entre unos límites no muy bien definidos. El tener en cuenta esta distribución de tamaños añade una complejidad elevada al problema por lo que de momento no tendremos en cuenta esta consideración.

Se supone que la pulpa está dividida en dos partes, una parte superficial que está compuesta por una capa de agua y una parte interna que está compuesta por la pulpa con su correspondiente parte de agua.

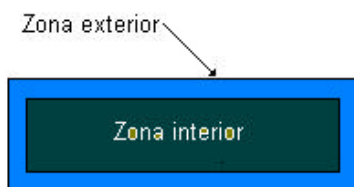


Figura 4. Zonas diferenciadas en la pulpa

Así desde la zona exterior se transmite calor por conducción hacia el interior de la pulpa y desde el interior se produce la transferencia de materia hacia el exterior.

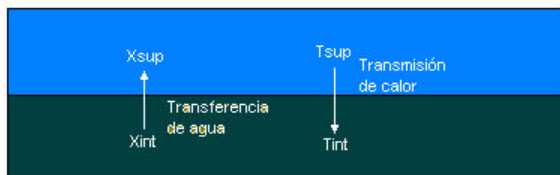


Figura 5. Transmisión de materia y energía entre las distintas zonas de la pulpa

Se calcula así una humedad en el exterior de la pulpa y otra en la parte interna de la pulpa.

3.4 ECUACIONES DEL MODELO

En el proceso de secado tienen lugar varios fenómenos, tanto de transferencia de materia como de energía. En lo que a la transferencia de materia se refiere, por un lado se produce la evaporación del agua superficial y por otro lado hay un proceso de difusión desde el interior hacia la superficie por capilaridad. En lo que respecta a la transferencia de energía, el fenómeno más importante es la transferencia de calor desde los humos hacia la pulpa, esta energía es la que toma el agua para evaporarse.

3.4.1 Zonas de Secado

En el proceso de secado pueden distinguirse dos zonas de comportamiento diferenciadas, la zona de secado constante y la zona de secado decreciente [3]. En la zona de velocidad de secado constante se supone que la pulpa está recubierta por una capa homogénea de líquido. Esto se mantiene hasta que la humedad superficial está por debajo de un valor crítico, en ese momento la superficie empieza a secarse, estamos entonces en la zona de secado decreciente, en la que la velocidad de secado está limitada por la velocidad de transferencia de agua

desde el interior de la pulpa. Si la velocidad de evaporación del agua es demasiado elevada y el agua que llega a la superficie por difusión no es suficiente, se produce el calentamiento de las pulpas y se puede llegar al incendio en el interior del secadero.

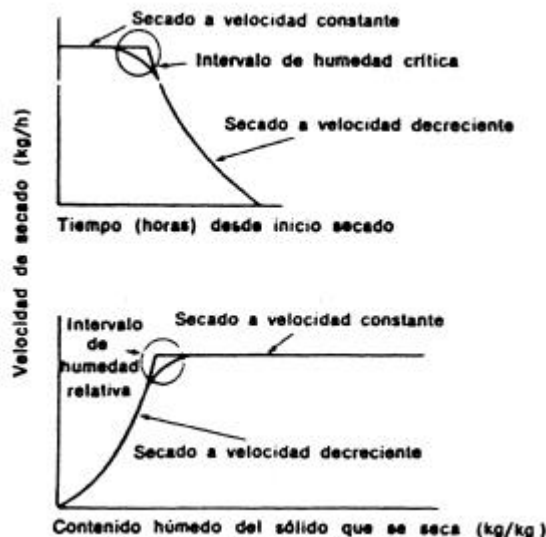


Figura 6. Curvas de Secado

Para modelar este fenómeno se ha definido una superficie húmeda en tanto por 1 que es el cociente entre la humedad superficial y la humedad crítica, siendo uno siempre que la humedad superficial es mayor que la humedad crítica.

$$S_{h,j} = \max \left(\min \left(1, \frac{X_{sup,j}}{X_c} \right) 0 \right) \quad (1)$$

Siendo $S_{h,j}$ la superficie húmeda en la etapa j , $X_{sup,j}$ la humedad superficial en la etapa j y X_c la humedad crítica (kg agua/kg sólido seco).

De esta forma se supone que siempre que la humedad superficial de la pulpa está por encima de un valor crítico no va a haber problemas de secado excesivo. Cuando este término empieza a ser inferior a 1, se entiende que la superficie de la pulpa está empezando a quedarse sin una película externa de agua, en ese momento al calor que estaba siendo utilizado para evaporar el agua superficial empieza a calentar la directamente la superficie de la pulpa lo que origina problemas de aumento de la temperatura en el interior del tambor.

3.4.2 Balances de energía mecánica

La velocidad de los humos se calculará como el flujo volumétrico por la sección transversal libre para el flujo del tambor

La sección transversal libre para el flujo será la sección transversal del tambor menos el espacio

ocupado por las pulpas y por la estructura interna del tambor.

La velocidad de los humos a la entrada del secadero se calcula como:

$$v_{h,1} = \frac{F_{h,1}}{Secc - (m_{p,1}/\rho_p)} \quad (2)$$

Siendo $F_{h,1}$ el flujo volumétrico de los humos (m^3/s) y Secc la sección transversal del tambor en m^2 y ρ_p la densidad de la pulpa prensada (kg/m^3) Esta densidad se supone constante igual a 325 [2]

El volumen del interior del secadero se calcula a partir del diámetro y la longitud del secadero:

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot L \quad (3)$$

Donde V es el volumen del secadero (m^3), L es la longitud del secadero (m) y D es el diámetro del secadero (m).

La velocidad con la que la pulpa abandona cada una de las etapas del secadero se supone que es proporcional a la velocidad de los humos que atraviesan el secadero y proporcional también a la velocidad de rotación del secadero, ya que cuantas más veces gire el secadero más veces se producirá el vertido de pulpa que es arrastrado por la corriente de gas, es también inversamente proporcional a la cantidad de masa que existe en esa zona del secadero ya que cuanto mayor sea esta masa mas dificultad tendrá la corriente de gas para arrastrarla:

$$v_{p,j} = \frac{k_v \cdot v_{h,j} \cdot v_{rot}}{m_p} \quad (4)$$

Donde $v_{h,j}$ es la velocidad de los humos en la etapa j (m/s), $v_{p,j}$ es la velocidad de la pulpa en la etapa j (m/s), v_{rot} es la velocidad de rotación del secadero (s^{-1}) y k_v es una constante de ajuste (kg s)

3.4.3 Balances de materia

Como ya se explicó en el apartado 3.2, a partir de la ecuación del balance de materia distribuido, se obtienen n ecuaciones, una para cada etapa de discretización, estas ecuaciones corresponden a los balances globales a cada zona.

3.4.3.1 Balances de materia a la pulpa

En los sistemas en los que sólo existe transferencia de uno de los componentes de una mezcla resulta muy útil realizar los balances en base exenta del componente que se transfiere. Las concentraciones se

expresarán así en las unidades de kg/kg de sólido seco.

En este caso los balances de materia se realizarán en base exenta de agua, ya que es el único componente cuya composición varía a lo largo del sistema.

Las concentraciones en exento de agua en la pulpa se calcularán como:

$$C_{p,i}^* = \frac{C_{p,i}}{(1 - C_{p,H_2O})} \quad (5)$$

Donde $C_{p,i}^*$ es la concentración en exento del componente i en la pulpa, $C_{p,i}$ es la concentración del componente i en la pulpa, C_{p,H_2O} es la concentración de agua en la pulpa.

Los flujos de masa también se expresarán tomando como exento el agua. Para distinguir con facilidad los flujos másicos, los flujos en exento se denotarán por M y los flujos totales por W.

W[=] kg sólido seco /s

M[=] kg sólido total /s

El flujo másico de pulpa seca que entra al secadero expresado en exento será:

$$W_{pe,1} = M_{pe,1} \cdot (1 - C_{agua,1}) \quad (6)$$

La masa de pulpa en cada etapa se calcula

$$m_{p,j} = W_{pe,j} - W_{ps,j} \quad (7)$$

Las masas de sólido seco no variarán a lo largo de toda la longitud del secadero por efecto de transferencia de materia sólo por efecto de transporte.

Este flujo se propagará de la siguiente manera:

$$W_{ps,j-1} = W_{pe,j} \quad (8)$$

Como ya se explicó con anterioridad en las suposiciones de modelado, se considera que parte de la humedad de la pulpa está en la parte superior y parte en la parte interior.

Supondremos que la humedad superficial es el 2% del agua interna, que es un valor característico para la humedad que sale de las prensas de pulpa en las industrias azucareras.

$$X_{tot} = X_{sup} + X_{int} \quad (10)$$

Donde X son las humedades expresadas en kg/kg ss.

El único componente al que se hace un balance etapa a etapa es del agua, para el resto de los componentes, dado que los balances están realizados en exento, las concentraciones de las sustancias que no se transfieren permanecen constantes a lo largo de todo el secadero:

$$C_{p,i,j}^* = C_{p,i,j+1}^* \quad (11)$$

$C_{p,i,j}^*$ es la concentración de la sustancia i en la pulpa en la etapa j y $C_{p,i,j+1}^*$ es la concentración de la sustancia i en la pulpa en la etapa j+1.

3.4.3.2 Balance de materia a la humedad superficial de la pulpa

A la superficie de la pulpa llega agua por difusión procedente de la parte interna de la pulpa, por otro lado existe un flujo de agua que se está evaporando desde la superficie. Teniendo en cuenta esto, el balance a la humedad superficial en la pulpa será de la siguiente manera:

$$\frac{dS_j X_{SUP,j}}{dt} = W_{pe,j} X_{SUPe,j} - W_{ps,j} X_{SUPs,j} - A \frac{h}{I} (T_G - T_S) + k(X_{INT} - X_{SUP}) \quad (12)$$

Donde el término $A \frac{h}{I} (T_G - T_S)$ hace referencia a la velocidad de evaporación y $k(X_{INT} - X_{SUP})$ hace referencia al flujo de agua desde el interior de la masa de pulpa hacia el exterior, S es la masa de sólido seco en cada etapa (kg/s), A es el área de transferencia (m^2), h es el coeficiente de transferencia de calor ($W/m^2 C$), λ es el calor latente de vaporización del agua (J/kg), X son las humedades kg H₂O/kg de sólido seco), T son la temperaturas (°C), k es una constante de difusión (kg/s).

3.4.3.3 Balance de materia a la humedad interna de la pulpa

En la zona interior de la pulpa el único fenómeno que tiene lugar es la transferencia de agua hacia el exterior, teniendo en cuenta esto el balance al agua interna será de la forma:

$$\frac{dS_j X_{INT,j}}{dt} = W_{pe,j} X_{INTe,j} - W_{ps,j} X_{INTs,j} - k(X_{INT} - X_{SUP}) \quad (13)$$

3.4.3.4 Balance de materia al gas

De la misma forma que para el caso del sólido, resulta útil para el gas realizar los balances de materia tomando como componente exento el agua. La forma

de calcular las composiciones en exento de agua es análoga a la forma en la que se hacía en el sólido.

$$C_{h,i}^* = \frac{C_{h,i}}{(1 - C_{h,H2O})} \quad (14)$$

Donde $C_{h,i}^*$ es la concentración en exento del componente i en los humos, $C_{h,i}$ es la concentración del componente i en los humos y $C_{h,H2O}$ es la concentración de agua en los humos.

Con esto, como ya se explicó, para todos los componentes de la fase gas, excepto el agua, las concentraciones se mantienen constantes a lo largo de todo el secadero.

$$C_{h,i,j}^* = C_{h,i,j+1}^* \quad (15)$$

El flujo másico en exento en la fase gas también se mantiene constante:

$$W_{hs,j} = W_{hs,j+1} \quad (16)$$

Donde $W_{hs,j}$ es el flujo másico de humos que sale de la etapa j (kg/s) y $W_{hs,j}$ es el flujo másico de humos que entra en la etapa j (kg/s).

3.4.3.5 Balance a la humedad del gas

El balance a la humedad del gas es muy sencillo ya que el único fenómeno que tiene lugar es la transferencia de agua evaporada que se incorpora a la fase gas. El balance a la humedad queda como sigue:

$$0 = W_{he,j} Y_{e,j} - W_{hs,j} Y_{s,j} + A \frac{h}{I} (T_G - T_S) \quad (17)$$

Donde $Y_{e,j}$ es la humedad que entra en la etapa j y $Y_{s,j}$ es la humedad que sale de la etapa j.

3.4.4 BALANCES DE ENERGÍA

Los balances de energía resultan algo más complejos que los balances de materia. Existen multitud de fenómenos asociados a la transferencia de energía, como son los flujos de calor desde los gases hacia la pulpa, los flujos de calor de los gases hacia la estructura del secadero, la transferencia de calor en el interior de la pulpa, los flujos de calor asociados a la transferencia de materia, radiación, etc.

Un modelo que tuviera en cuenta todas estas características sería muy complejo, por otro lado sería necesario disponer de muchos datos y parámetros de los que no se dispone. Por ello se han realizado una serie de simplificaciones.

Se considera así solamente una transferencia de calor entre el gas y la pulpa debida a la diferencia de

temperaturas y una transmisión de calor asociada a la transferencia de agua entre la pulpa y los gases.

3.4.4.1 Balance de energía a la pulpa

Como se explicó se considera una transferencia de calor entre los humos y la pulpa y una transferencia de materia entre la pulpa y los humos. Esto se ve reflejado en el balance de energía de la siguiente forma:

$$\frac{dm_{p,j} \cdot H_{p,j}}{dt} = W_{pe,j} H_{pe,j} (1 + X_{TOTe,j}) - W_{ps,j} H_{ps,j} (1 + X_{TOTs,j}) + Q_j + X_{evap,j} (I + H_{ags,j}) \quad (18)$$

Donde $m_{p,j}$ es la masa de pulpa húmeda en la etapa j (kg ss), $H_{p,j}$ es la entalpía de la pulpa húmeda en cada etapa que es igual a la entalpía a la salida la etapa j ($H_{ps,j}$) (kJ/kg), $H_{pe,j}$ es la entalpía de la pulpa húmeda a la salida la etapa j (kJ/kg), X_{evap} es la cantidad de agua que se evapora (kg/s), se calcula mediante la expresión:

$$X_{evap,j} = A \frac{h}{I} (T_{G,j} - T_{S,j}) \quad (19)$$

En este caso el flujo de calor entre la pulpa y los humos está multiplicado por $S_{hum,j}$ así cuando este coeficiente valga menos de 1, es decir, la superficie no tenga una capa de agua suficiente, parte del calor pasará a la parte interna de la pulpa y no se empleará sólo en evaporar el agua superficial.

Q_j es el flujo de calor que recibe la pulpa de los gases en la etapa j , este calor viene dado por la expresión:

$$Q_j = Ah(T_{G,j} - T_{S,j}) \quad (20)$$

Es decir, es proporcional a la diferencia de temperaturas entre la pulpa y la pulpa.

3.4.4.2 Balance de energía al gas

En la fase gas tiene lugar una transferencia de calor asociada a la cantidad de agua que se está evaporando y una transferencia de calor hacia la pulpa por diferencia de temperaturas, el balance queda como sigue:

$$0 = H_{he,j} (W_{he,j} + Y_{e,j} W_{he,j}) - H_{hs,j} (W_{hs,j} + Y_{s,j} W_{hs,j}) - Q_j + X_{evap,j} (I + H_{ags,j}) \quad (21)$$

$H_{he,j}$ es la entalpía del gas húmedo que entra en la etapa j (kJ/kg) y $H_{hs,j}$ es la entalpía del gas húmedo que sale de la etapa j (kJ/kg).

El último término hace referencia al agua que se evapora, por la entalpía en fase gas.

4 RESULTADOS EN SIMULACIÓN

En este apartado vamos a analizar como se comporta el modelo descrito con anterioridad en simulación.

Necesitamos optimizar el número de etapas de discretización. Para ello representamos el número de etapas de discretización frente a la humedad a la salida. Consideraremos que el resultado es el óptimo cuando la solución no difiera de manera significativa por el hecho de añadir o quitar un elemento de discretización.

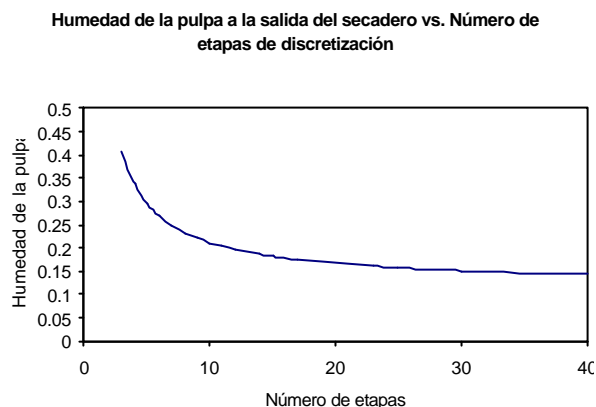


Figura 7. Determinación del número de etapas de discretización.

El número de etapas que se ha fijado es de 20.

Para llevar a cabo las simulaciones se han supuesto una serie de condiciones de contorno, estas condiciones son las condiciones del gas natural que entra al secadero, las condiciones del aire que entra y las condiciones de la pulpa que entra al secadero, así como la presión en el interior del secadero.

Las condiciones en las que se ha llevado a cabo el experimento son las siguientes:

- Presión en el interior del secadero: 1 bar
- Temperatura de entrada de los humos: 698 °C
- Flujo másico de humos a la entrada: 32.7 kg/s
- Composición de los humos a la entrada:
 - Agua: 6.6 %
 - CO2: 76.0 %
 - N2: 17.3 %

Temperatura de entrada de la pulpa: 40 °C

- Flujo másico de la pulpa a la entrada: 13.5 kg/s
- Composición de la pulpa a la entrada:
 - Agua: 77.8 %
 - Sustancia Seca: 22.2 %

4.1 RESULTADOS EN ESTADO ESTACIONARIO

No se dispone de muchos datos reales del secadero, los dos únicos datos de los que se dispone en la realidad son la humedad a la salida y la temperatura de los humos, estos dos datos concuerdan con los que se obtienen en simulación. El resto de los valores en estado estacionario, serán validados de manera cualitativa, se analizarán los perfiles en el interior del secadero de manera que los resultados que se obtengan sean lógicos y tengan la forma esperada.

4.1.1 Perfiles de humedad y de temperatura de la pulpa

En la figura 8 podemos ver como la humedad del gas va aumentando a medida que nos acercamos a la zona final del secadero. Esto es lógico ya que el gas va tomando la humedad de la pulpa a lo largo del secadero.

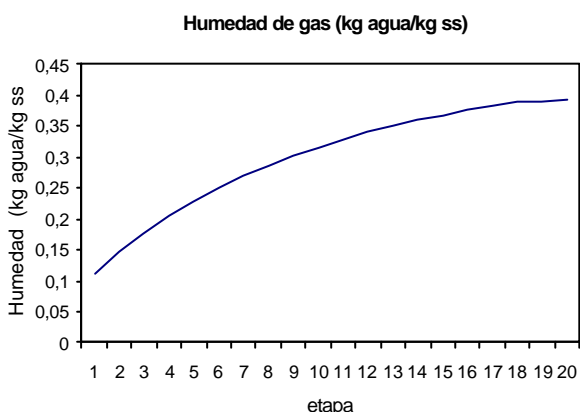


Figura 8. Perfil de humedades en el gas

Podemos ver también como la humedad de la pulpa disminuye a medida que nos acercamos a la salida del secadero. Esto resulta evidente ya que la pulpa se va secando y por lo tanto perdiendo humedad a lo largo del secadero.

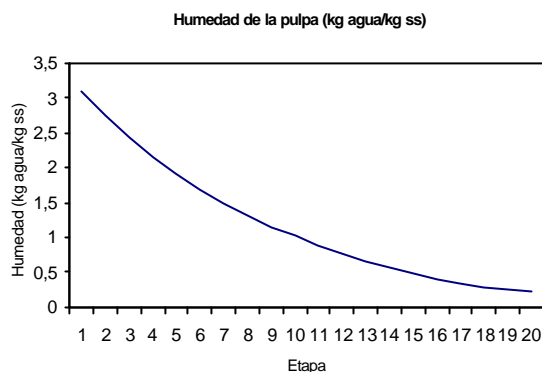


Figura 9. Perfil de humedades en la pulpa

En la siguiente figura se muestra el perfil de temperatura de la pulpa y los humos para este proceso. Podemos ver como la temperatura de la pulpa es constante a lo largo de todo el secadero menos en la última zona del secadero, esto es debido a que en la zona final del secadero la superficie externa de la pulpa ha empezado a secarse y parte del calor que aportan los gases se transmite a la pulpa directamente, aumentando su temperatura.

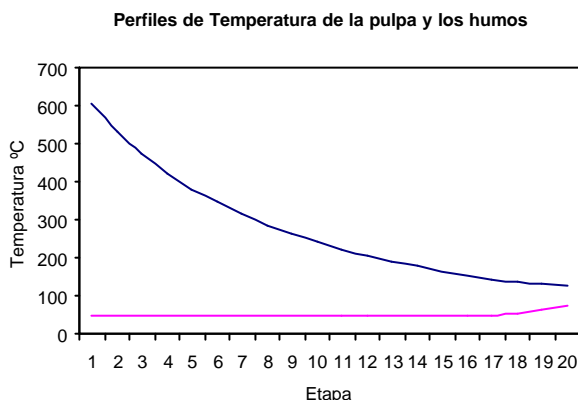


Figura 10. Perfiles de temperatura de la pulpa y los humos.

4.2 RESULTADOS EN ESTADO NO ESTACIONARIO

Se han realizado también una serie de experimentos dinámicos para comprobar que el funcionamiento del sistema es el correcto. No se dispone de datos reales para comparar el sistema, pero se hará el análisis basado en el conocimiento del proceso.

Se han realizado una serie de experimentos significativos

4.2.1 Aumento en la cantidad de pulpa que entra al secadero

Podemos ver como responde el sistema ante un aumento en la cantidad de pulpa que entra en el secadero.

Si aumentamos la cantidad de pulpa que entra desde 13.5 hasta 15 kg/s. Podemos ver como responden distintas variables.

Vemos como al aumentar la cantidad de pulpa que está entrando en el secadero la humedad a la salida aumenta de forma considerable. Esto es lógico, ya que aumenta la cantidad de pulpa que está entrando en el secadero, y por tanto la cantidad de agua, y la masa de gas, que es la que porta la energía para la evaporación, sigue siendo la misma.

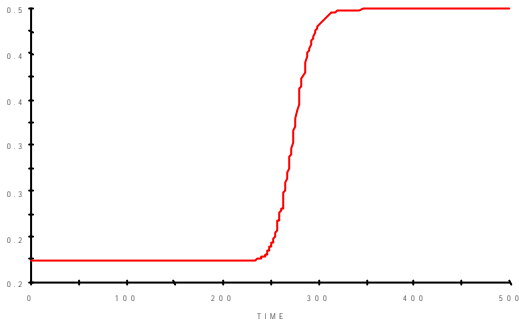


Figura 11. Humedad de la pulpa a la salida del secadero.

Podemos ver como evoluciona esta humedad a lo largo del secadero, en las distintas etapas, el salto en las humedades va siendo mayor a medida que nos acercamos al final del secadero y con un retardo mayor.

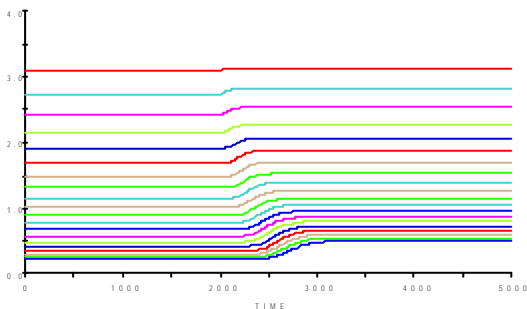


Figura 12. Humedad de la pulpa en las diferentes etapas de discretización del secadero.

Para hacernos una idea de lo que está ocurriendo en el interior del secadero podemos hacer una representación 3D en la que se puede ver la evolución de la humedad con el tiempo y con la distancia a lo largo del secadero.

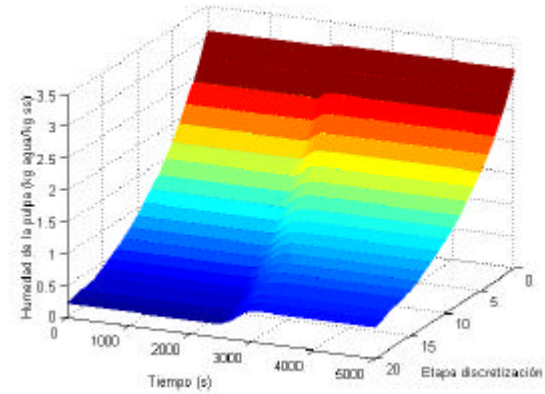


Figura 13. Representación 3D de la evolución de la humedad vs. Tiempo vs. Distancia al producir un aumento en la humedad de la pulpa.

Si representamos la evolución de la temperatura de la pulpa frente al tiempo, figura 14, vemos como la temperatura disminuye ya que, al existir una mayor cantidad de pulpa, el flujo de calor necesario para que la pulpa se mantenga a esa temperatura debe ser mayor. El segundo efecto, no menos importante, es que al aumentar la humedad de la pulpa, la pulpa de la zona final del secadero tienen una humedad mayor en el exterior, por lo tanto no se produce el efecto de aumento térmico que se produce en condiciones normales por efecto de la disminución de la humedad exterior. Por ello la temperatura pasa a ser constante a lo largo de todo el secadero.

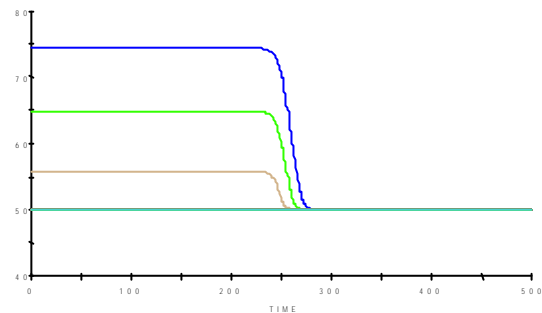


Figura 14. Temperatura de la pulpa en las diferentes etapas de discretización del secadero

En el caso de los gases un aumento en la cantidad de pulpa produce un aumento de la humedad de salida, ya que al disminuir la temperatura de la pulpa, la diferencia térmica entre los gases y la pulpa es mayor, por lo que la cantidad de agua que se evapora también aumenta.

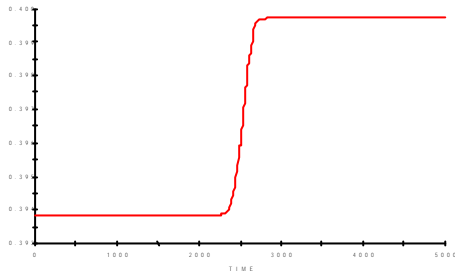


Figura 15. Humedad de los gases a la salida del secadero

La temperatura de salida de los gases disminuye ya que al disminuir la temperatura de la pulpa y aumentar la cantidad de agua que se evapora, la cantidad de calor que aporta el gas es mayor y por lo tanto su disminución de temperatura.

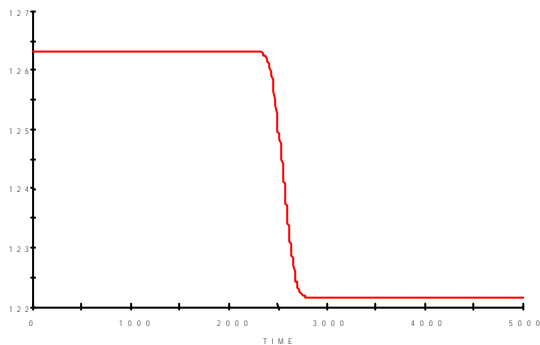


Figura 16. Temperatura de los humos a la salida del secadero

4.2.2 Aumento en la cantidad de gas de secado que entra al secadero

Para realizar este ensayo vamos a dar un salto desde 32.67 a 36 kg/s en la cantidad de gases de secado que entran al secadero.

La humedad de los gases disminuye de manera brusca ya que la velocidad de los gases es elevada y al existir una mayor cantidad de gas en el secadero casi instantáneamente la concentración de agua en los mismos cae de manera rápida. Después de un retardo se produce un pequeño aumento en la humedad para luego volver a caer.

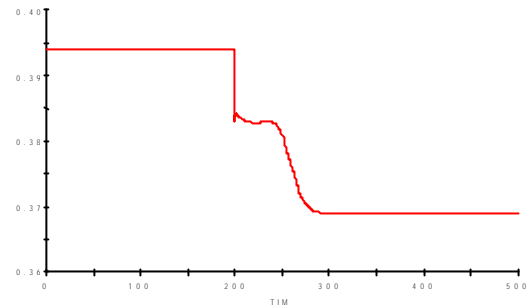


Figura 17. Humedad de los gases a la salida del secadero

Esto es debido a que inicialmente al aumentar la cantidad de gas aumenta la cantidad de agua que se está evaporando por lo que la humedad del gas aumenta, pero al aumentar esa cantidad de agua que se evapora de la pulpa, la humedad superficial de la pulpa disminuye por lo que la zona del secadero en la que el calor se aporta no sólo al agua sino también a la pulpa aumenta, es decir, se emplea una mayor cantidad de calor en calentar la pulpa. Por esto, aunque la cantidad de agua que se evapora en todo el secadero globalmente es mayor la concentración de agua en los humos cae.

En la figura siguiente vemos como en la zona en la que el calor se aporta no sólo para evaporar el agua sino también en calentar la pulpa es en la que se produce esa segunda caída en la humedad del gas.

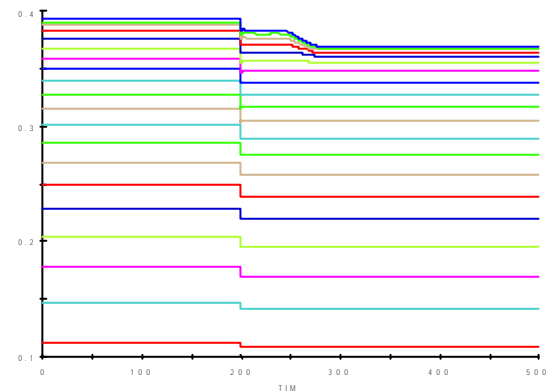


Figura 18. Humedad de los gases en las diferentes etapas de discretización del secadero

Vemos como la temperatura de los humos aumenta a lo largo del secadero, esto es lógico ya que al aumentar el aporte térmico, en todo el secadero la temperatura de los humos aumenta. En la zona final del secadero en la que se produce el calentamiento de la pulpa, este calentamiento aumenta más ya que la diferencia térmica entre la pulpa y los gases disminuye y por lo tanto el flujo de calor.

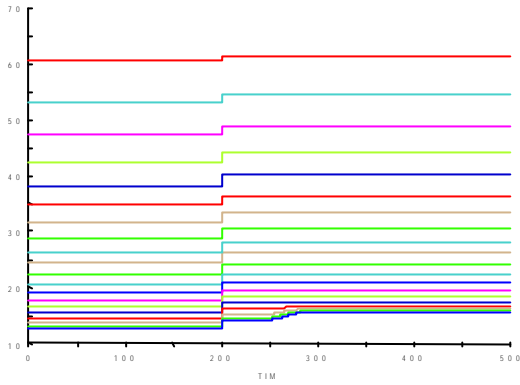


Figura 19. Temperatura de los humos en las diferentes etapas de discretización del secadero

En el caso de la pulpa la humedad disminuye como es de esperar. Ya que la cantidad de calor aportada es mayor con lo que se evapora una mayor cantidad de agua.

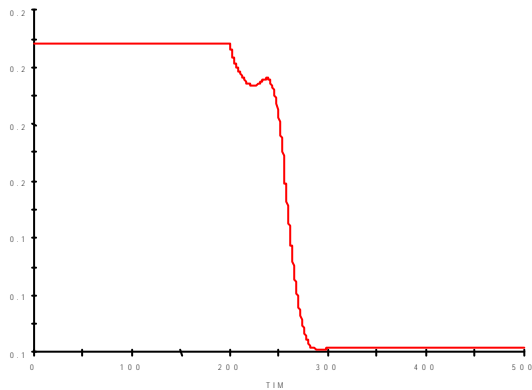


Figura 20. Humedad de la pulpa a la salida del secadero.

Vemos como la temperatura de la pulpa aumenta en este caso de manera peligrosa en la última etapa, vemos también como la zona en la que la pulpa superficial es mayor y asciende ya a 6 etapas.

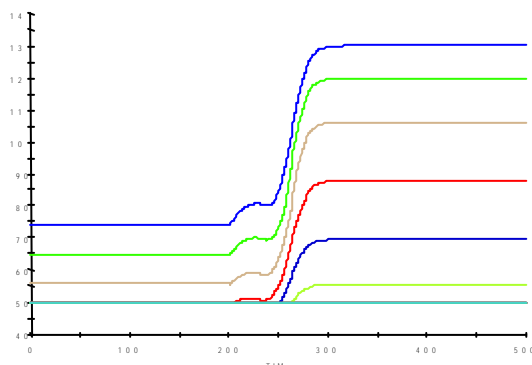


Figura 21. Temperatura de la pulpa en las diferentes etapas de discretización del secadero

4.2.3 Variación en el contenido de humedad del sólido

Otro ejemplo que resulta útil para comprobar el funcionamiento del secadero es que ocurre cuando se produce un aumento en la humedad de entrada de la pulpa.

Veamos que ocurre si la concentración de agua a la entrada cambia desde 0.77 a 0.82 en tanto por uno en peso.

Vemos como la humedad a la salida aumenta, como era de esperar, ya que la cantidad de calor que se aporta no aumenta y no es capaz de absorber el aumento en la cantidad de agua de la pulpa.

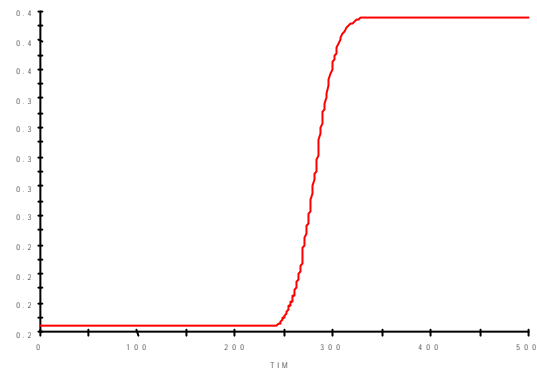


Figura 22. Humedad de la pulpa a la salida del secadero.

A lo largo del secadero la humedad de la pulpa va aumentando, y va retardándose.

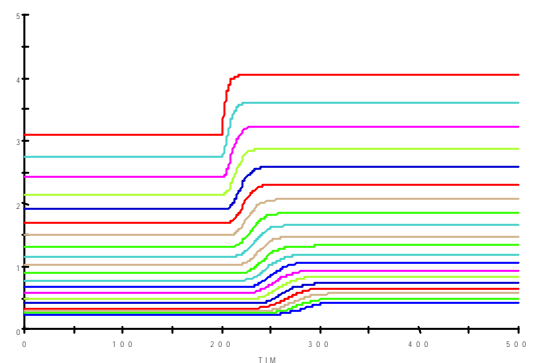


Figura 23. Humedad de la pulpa en las diferentes etapas de discretización del secadero.

En el caso de la temperatura el efecto es el mismo que ya se explicó para el caso de un aumento en la cantidad de pulpa que entra al secadero. Al aumentar la humedad superficial no se produce el calentamiento de la pulpa.

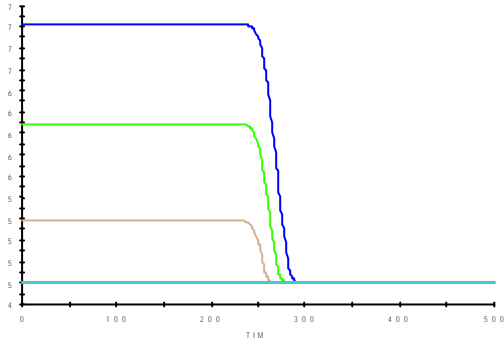


Figura 24 Temperatura de la pulpa en las diferentes etapas de discretización del secadero

En el caso de los humos vemos como la humedad aumenta pero muy ligeramente ya que aunque la cantidad de agua que se introduce es mayor, la cantidad de calor que se aporta es la misma y no se consigue aumentar el exceso de agua introducido.

El pequeño aumento que se produce es debido a la disminución de temperatura de la pulpa en las últimas etapas del secado.

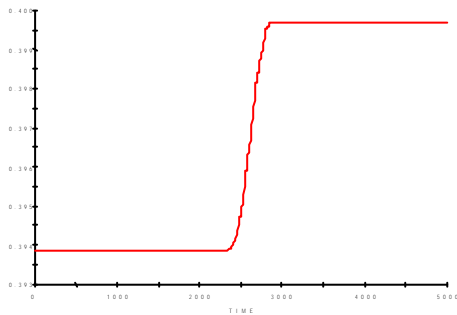


Figura 25. Humedad de los gases a la salida del secadero

De hecho en las primeras zonas en las que la temperatura es constante, la humedad del gas permanece constante. (la cantidad de agua evaporada sólo depende de la diferencia de temperaturas gas – pulpa).

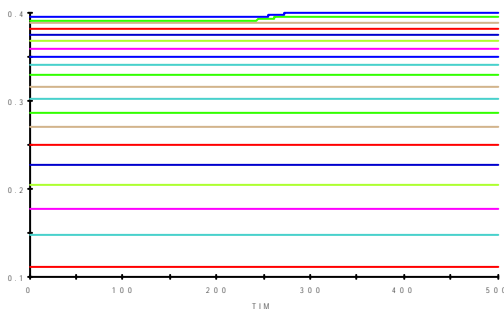


Figura 26. Humedad de los humos en las diferentes etapas de discretización del secadero.

Como consecuencia de esto la temperatura de los humos disminuye, pero sólo en las etapas en las que se produce una disminución de la temperatura, al aumentar el gradiente térmico el gas pierde algo de energía.

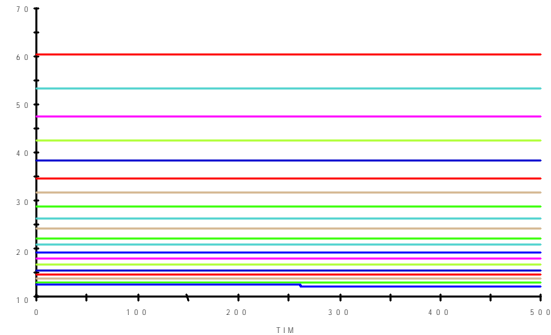


Figura 27. Temperatura de los humos en las diferentes etapas de discretización del secadero

4.2.4 Aumento de la velocidad de rotación del secadero

En este experimento disminuimos la velocidad de rotación del secadero desde 1 hasta 0.2 rpm.

Inmediatamente se produce una disminución súbita de la velocidad de la pulpa, esto es debido a la parada del secadero, que propicia que el movimiento de la pulpa en forma de cortina disminuya y por tanto que disminuya el tiempo en el que está expuesto a la corriente de gas que lo empuja.

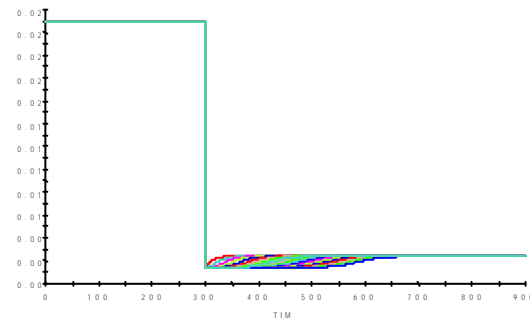


Figura 28. Velocidad de la pulpa en las diferentes etapas de discretización del secadero

Esta disminución en la velocidad origina un aumento en la masa de pulpa en todas las etapas del secadero.

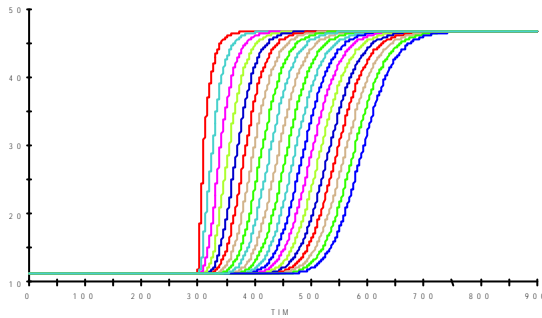


Figura 29. Masa de pulpa en las diferentes etapas de discretización del secadero

Este cambio hace que transitoriamente todas las variables del secadero se vean afectadas. Como ejemplo, vemos a continuación como la pulpa que sale del difusor disminuye bruscamente al caer la velocidad de rotación, esto ocurre hasta que la masa acumulada, va alcanzando el final del secadero. Al cabo del tiempo se reestablece el estado de equilibrio ya que el flujo de entrada es constante el de salida debe serlo también al cabo del tiempo.

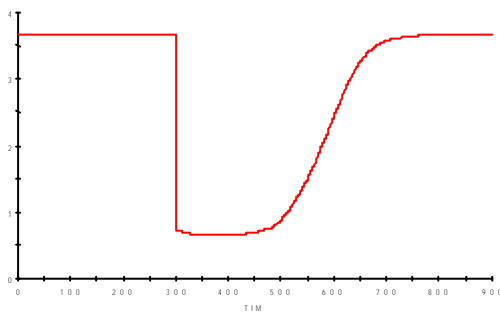


Figura 30. Flujo de pulpa a la salida del secadero.

5. CONCLUSIONES

Se ha planteado un modelo para un secadero de pulpa. Este modelo, está descrito por ecuaciones en derivadas parciales. De la discretización de estas variables y realizando una serie de simplificaciones se ha implementado el modelo en Ecosim y se ha procedido a su simulación.

Mediante la simulación del modelo obtenido podemos ver que los resultados en estado estacionario coinciden, para las mismas condiciones de contorno, con los datos de una factoría real. Los resultados dinámicos no pueden ser contrastados por falta de datos reales, pero resultan coherentes con el conocimiento que se tiene del proceso.

Referencias

- [1] *Ares Costoya, C.M.* (2000): Obtención de pellets a partir de remolacha: Modelado dinámico y simulación de un secadero rotatorio industrial. Proyecto fin de carrera. Universidad de Valladolid.
- [2] *Z. Bubnik, P. Kadlec, D. Urban, M. Bruhn:* Sugar Technologists Manual Ed. Bartens. 1995.
- [3] *H. W. Cremer, S. B. Watkins:* Chemical Engineering Practice. Volumen 7. Butterworths Scientific.
- [4] *R. A. Mc Ginnis* Beet sugar technology. 3d Edition. Beet Sugar Development Foundation.
- [5] *D. M. Himmelblau., K. B. Bischoff:* Analysis and Simulation of Processes. 1998. Reverté S.A.
- [6] *Kirk – Othmer:* “Encyclopedia of Chemical Technology” Volumen 4. Ed. John Eiley&Sons.
- [7] *Oldfield J.M.T.; Dutton, J.V.; Teague, H.J.* (1971) Int. Sugar Jour. 73, 3-8, 35-40,66-68.
- [8] *A. Merino (2002):* Modelado y Simulación de Sistemas de Parámetro Distribuido. Aplicaciones en la Industria Azucarera. Proyecto de Investigación. Universidad de Valladolid.
- [9] *P.W. van der Poel, H. Schiweck, T. Schwartz :* Sugar Technology. Beet and Cane Sugar Manufacture. 1998. Ed. Bartens
- [10] *Schiesser W.E.:* The numerical method of lines. Integration of Partial Differential Equations. Academic Press, Inc 1991.
- [11] EcosimPro Manual. EL Modelling Language. Version 3.0.
- [12] www.lehigh.edu/~wes1/apci/28apr00.ps, pp 66,67