

MODELADO DINÁMICO DE FILTROS DE JUGO EN INDUSTRIA AZUCARERA CON ECOSIMPRO

Susana Pelayo Díaz

Centro de Tecnología Azucarera, Universidad de Valladolid
C/Real de Burgos. Edificio Alfonso VIII. Planta baja s/n 47011 Valladolid - España
Tfno: 983 42 35 63. FAX: 983 42 36 16. Email: susana@cta.uva.es

Resumen

Los filtros de jugo carbonatado en una industria azucarera son sistemas complejos con funcionamiento discontinuo. Con Ecosimpro se ha modelado cada elemento que compone un filtro por separado, de tal forma que la unión de dichos elementos permita la simulación del filtro completo, incluyendo los parámetros y variables que permiten la simulación del comportamiento en batch.

Palabras Clave: Simulación, EcosimPro, modelado orientado a objetos, filtros de jugo, procesos batch.

1 INTRODUCCIÓN

En una Azucarera, la depuración tiene como objetivo la eliminación de la mayor cantidad posible de impurezas (no-azúcares) que se extraen de la coseta en la difusión. La eliminación de los distintos no-azúcares se consigue mediante precipitaciones sucesivas a distintos pH y temperaturas. Una mala depuración va a provocar un aumento del color y una disminución de la calidad final del azúcar obtenido.

El jugo procedente de la difusión pasa por diferentes etapas en las que se añade lechada de cal para ir consiguiendo determinadas alcalinidades que permiten la precipitación de las sustancias a eliminar. La etapa siguiente es la adicción de CO₂ que reacciona con la cal presente en el jugo precipitando en forma de carbonato cálcico (carbonatación). Este sólido arrastra los no azúcares precipitados en etapas anteriores. La separación de estos flóculos del jugo se lleva a cabo en los filtros. En un proceso azucarero típico existen dos etapas de carbonatación-filtración sucesivas.

La filtración es un proceso de separación que supone el paso de un líquido a través de una membrana porosa que retiene los sólidos que contiene el líquido y que interesa separar. El los procesos azucareros la filtración es de tipo "filtración por formación de torta": el medio de filtración establece las características iniciales de la filtración, pero a medida que los sólidos se van acumulando sobre la superficie del filtro, es la torta que se va formando la que más influye en el proceso de filtración.

El duración de un ciclo de filtración depende de la velocidad con la que aumenta la presión en la telas y en consecuencia con la que disminuye el flujo de entrada.

Las principales variables que influyen en un proceso de filtración son: viscosidad, espesor y porosidad de la torta, presión diferencial y superficie del filtro. También hay otras variables a considerar, aunque su influencia es secundaria: densidad del jugo, concentración de no-azúcares, temperatura, duración del ciclo de filtración, tamaño y compresibilidad de las partículas sólidas, adición de coadyugantes y estado de las telas del filtro.

Los filtros de una azucarera funcionan en discontinuo, son procesos batch. Un proceso batch puede definirse como aquel que da lugar a la obtención de cantidades finitas de producto a partir de una determinada cantidad de materiales de entrada que pasan por un conjunto de actividades de procesamiento en un periodo de tiempo finito (definición del estandar ISA-S88,1995).

2 OBJETIVO

Los objetivos que se han fijado a la hora de desarrollar este trabajo pueden resumirse en:

- estudio la unidad de proceso y los elementos que la componen.
- estudio del funcionamiento discontinuo del filtro y su modelado.
- desarrollo de un modelo matemático dinámico genérico y su simulación con Ecosimpro.
- estimación de parámetros y validación del modelo por comparación con datos reales de operación.

Este trabajo forma parte de un proyecto cuyo objetivo final ha sido el desarrollo de un simulador completo de una planta de obtención de azúcar para el entrenamiento de operarios

3 DESCRIPCIÓN DE UN FILTRO

El esquema del filtro de depuración de jugo elegido para el modelo puede verse en la figura 1. Este tipo de filtros constan de varios elementos:

- *Cuerpo del filtro*: donde se encuentran alojadas las *telas* que permiten la filtración
- *Base inferior cónica*: donde se almacenan los lodos hasta su descarga
- *Depósito de soplado*: donde se almacena el primer jugo filtrado para su posterior utilización en el lavado de telas.
- *Válvulas*: permiten la entrada o salida de las distintas corrientes y facilitan el funcionamiento ciclado del filtro.

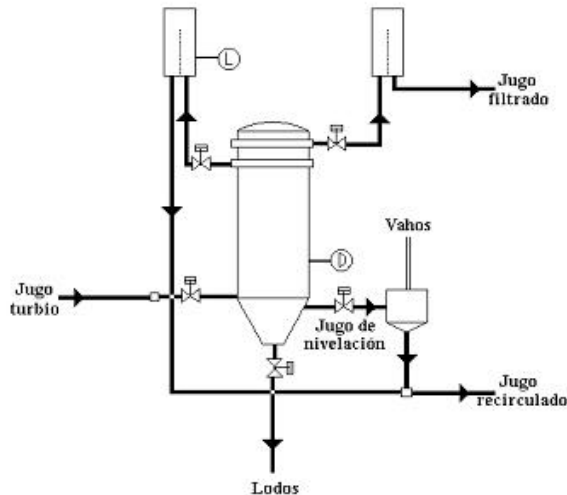


Figura 1. Esquema de filtro de jugo

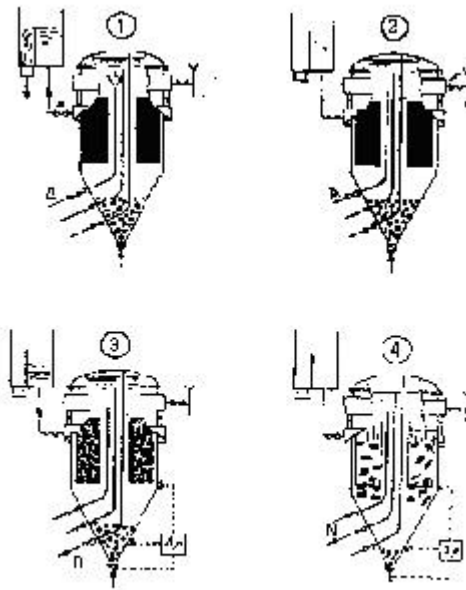


Figura 2. Etapas del ciclo de filtración

Las etapas de cada ciclo de filtración se rigen por la temporización del filtro que es la que gobierna la apertura y cierre de las distintas válvulas existentes. La temporización programada en este caso es la que aparece en la tabla 1 y su representación gráfica puede verse en la figura 4:

De forma genérica este proceso de filtración consta de las siguientes etapas (figura 2):

- 1) *Filtración Inicial*: las tortas se van formando sobre las telas a medida que pasa el jugo. Este primer jugo, que puede arrastrar algún sólido si la torta no se ha formado completamente, se almacena en el depósito de soplado para su posterior utilización.
- 2) *Filtración*: la filtración sigue, pero ahora los jugos ya son enviados al depósito de jugo filtrado.
- 3) *Final de la filtración*: una vez que deja de entrar jugo turbio al filtro, se produce una descompresión del mismo. El jugo que estaba en el depósito de soplado entra de nuevo al filtro pero en contracorriente para facilitar el desprendimiento de las tortas.

Se efectúa la extracción de los lodos procedentes del ciclo anterior.

- 4) *Final de la extracción*: las tortas desprendidas se acumulan en el fondo del filtro hasta el siguiente ciclo, en el que serán extraídas.

Tiempo	Descripción
TAUF	Tiempo completo del ciclo: desde el cierre de la válvula de alimentación VA hasta el cierre de la válvula de alimentación VA
TI	Tiempo de reciclado: desde el cierre de la válvula de descompresión VD hasta el cierre de la válvula de reciclado VR
T2	tiempo que separa el cierre de la válvula de alimentación VA y la apertura de la válvula de descompresión VD
T3	Tiempo de descompresión: desde la apertura de la válvula de descompresión VD hasta el cierre de dicha válvula VD
T4	Tiempo de extracción máximo: desde la apertura de la válvula de extracción VE hasta el cierre de dicha válvula VE
T5	Tiempo antes de la nivelación: de apertura de la válvula de descompresión VD hasta la apertura de la válvula de nivelación VN

Tabla 1. Temporización del filtro

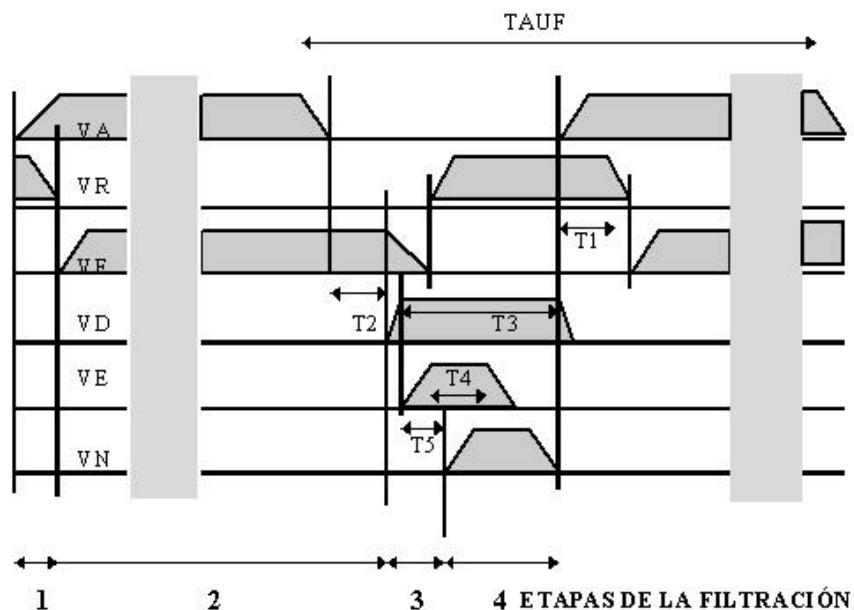


Figura 3: Visualización de las etapas del ciclo de filtración.

El jugo turbio que entra a los filtros está compuesto por una gran cantidad de sustancias. En el modelo desarrollado se han considerado las siguientes especies químicas: agua, azúcar, impurezas disueltas, impurezas precipitadas, calcio disuelto, óxido de calcio, carbonato cálcico, ión carbonato, protones e hidroxilos. A su vez, las impurezas disueltas pueden considerarse como un único componente o dividirse en proteínas, amidas, azúcares invertidos y otras sustancias. El modelo generado permite, mediante el valor de un parámetro, tratar las impurezas como un todo o especificarlas.

En estos filtros, los lodos producidos en el ciclo de filtración anterior se van acumulando en el fondo del filtro en el ciclo actual. Durante ese tiempo, se produce una sedimentación de las sustancias más pesadas por lo que antes de la descarga la densidad de los lodos en el fondo del filtro es mucho mayor que en la parte superior.

Atendiendo a este hecho, cada filtro tiene dos opciones para la extracción de lodos: extracción por "deltaP" o por "tiempo t4". En la extracción por densidad el dispositivo de control cierra automáticamente la válvula VE cuando se alcanza el valor de consigna fijado (densidad de lodos deseada). En el modelo únicamente se ha considerado la descarga de los lodos por tiempo.

4 MODELO FÍSICO MATEMÁTICO

Conceptualmente el filtro se ha dividido en una serie de elementos sencillos que faciliten el modelado. (ver figura 3):

- depósito de soplado
- telas del filtro
- cono 1: lugar donde se recogen inicialmente los lodos después del desprendimiento de las tortas
- cono 2: lugar donde queda almacenado definitivamente el lodo hasta su descarga en el ciclo siguiente
- válvulas

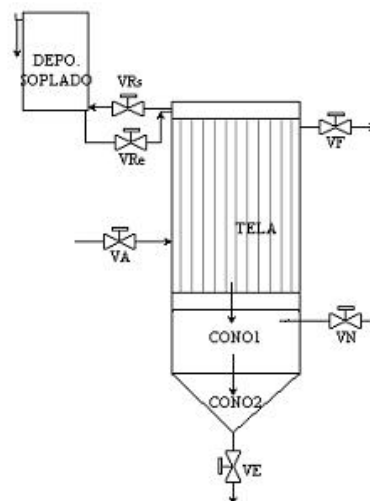


Figura 4: Esquema de componentes utilizados para el modelo del filtro.

Los modelos de cada elemento están basados en las leyes de conservación de materia, energía y cantidad de movimiento, buscando siempre un compromiso entre la representación fidedigna del proceso real y la complejidad matemática derivada de la misma. Este

compromiso se traduce en la consideración de determinadas suposiciones y cálculo de ciertos parámetros.

Los caudales de entrada y salida de cada elemento dependen de las condiciones de operación y del estado en que se encuentre el filtro, el cual viene impuesto por el momento del filtrado y la temporización que se haya definido. Esta temporización se ha incluido en el modelo mediante una serie de parámetros que van tomando valor 1 ó 0 cuando se activan o desactivan. La activación de esos parámetros implica la apertura o cierre de las válvulas automáticas presentes en el filtro

A continuación se resumen los aspectos más importantes del modelo de cada equipo.

4.1 TELAS DEL FILTRO

En las telas de los filtros se van acumulando los sólidos que han precipitado en etapas anteriores del proceso de depuración. La filtración ideal sería aquella que permitiese retener todos los sólidos que entran al filtro. En la realidad, parte de los sólidos pueden pasar a la corriente de filtrado debido principalmente a la mala formación de la torta o a la rotura de las telas. Estos efectos se han incluido en el modelo a través de un factor de eficacia del filtrado.

La retención de sólidos hace que la masa de la torta vaya aumentando gradualmente con la entrada de jugo turbio (etapas 1 y 2 de la tela) para después disminuir en la etapa de descarga (etapa 3). Para facilitar el modelado, se ha supuesto que sólo los sólidos quedan retenidos (impurezas precipitadas, óxido de cal y carbonato cálcico) y se han definido unas variables internas, llamadas 'W[j]_{RET}' que hacen referencia al flujo de cada componente sólido que se incorpora o sale de la torta. En la etapa de desprendimiento de la torta, esas variables internas se ha definido de forma proporcional al jugo que entra desde el depósito de soplado y a la masa existente de cada componente en cada momento.

$$\frac{d \text{masa}_{RET}[j]}{dt} = (k[1] + k[2] - k[3]) \cdot W_i[j]_{RET} \quad (1)$$

$$W_i[j]_{RET} = (k[1] + k[2]) \cdot W_i[j]_{\text{jugo turbio entra}} \cdot ff + k[3] \cdot \frac{\max(0, \text{masa}_{RET}[j]) \cdot k_{desc} \cdot W_{\text{jugo entra de D.Sopl}}}{\text{masa}_{RET}[j] + 10^{-8}} \quad (2)$$

en estas ecuaciones: ff (eficacia de la filtración), k (parámetro que fija los cambios de etapa), k_{desc} (cte. proporcionalidad), masa_{RET} (masa de cada componente en la torta), W (flujo másico total),

W_{RET} (flujo másico de cada componente entra/sale torta).

4.4.1 Flujos de entrada y salida

El flujo de entrada a la tela depende de dos factores:

- *Espesor de la torta que se va formando*: Cuanto mayor sea ese espesor, mayor será la resistencia al flujo y por tanto menor será el caudal de entrada. Esta dependencia se ha modelado como el producto de un caudal nominal máximo que entraría al filtro cuando este está completamente limpio y de un factor de corrección exponencial cuyo valor disminuye al aumentar el espesor de la torta.
- *Señal de control procedente del regulador de nivel del depósito de jugo turbio*. La acción del regulador de nivel afectaría a la bomba común que alimenta todos filtros presentes y por tanto a la diferencia de presión que da el flujo de entrada al filtro. En el modelo se ha optado por aplicar directamente la acción de salida del regulador sobre el caudal de entrada a cada filtro, esta simplificación evita la aparición de lazos algebraicos complejos que ralentizan de manera muy considerable la simulación de toda la sección de depuración.

$$W_{\text{jugo turbio entra}} = s_{in} \cdot [k[1] + k[2]] \cdot \exp(-\sqrt{esp} \cdot f_{esp}) \cdot W_{\text{max}} \quad (3)$$

En el comienzo del ciclo de filtración, el jugo que se obtiene como filtrado va al depósito de soplado donde se almacena para la posterior descarga de las tortas. Después de un tiempo de filtrado, cuando el espesor de la torta formada es el suficiente como para garantizar una buena retención de los sólidos, el jugo que se obtiene como filtrado pasa al depósito de jugo filtrado y de ahí a las etapas siguientes del proceso. El flujo total de jugo en ambas etapas es el flujo que entra menos lo que queda retenido en la tela.

$$W_{\text{jugo sale a D.Sopl}} = k[1] \cdot (W_{\text{jugoturbioentra}} - W_{RET}) \quad (4)$$

$$W_{\text{jugo filtrado}} = k[2] \cdot (W_{\text{jugoturbioentra}} - W_{RET}) \quad (5)$$

La composición de estos jugo debe recalcularse teniendo en cuenta las sustancias que quedan retenidas en la torta.

En la etapa de descarga de las tortas, entra en contracorriente el jugo que estaba acumulado en el depósito de soplado facilitando la evacuación de la torta. La mezcla de ese jugo y la torta (que se denomina lodo por el elevado contenido en sólidos) pasa al cono 1. El flujo total de lodo obtenido viene dado por la ecuación:

$$W_{lodo\ sale} = k[3] \cdot (W_{jugo\ entra\ de\ D.Sopl} + W_{RET}) \quad (6)$$

en estas ecuaciones: esp (espesor de la torta), f_{esp} (factor de corrección), k (parámetro que fija los cambios de etapa), s_n (señal de control), W (flujo másico total de cada corriente), W_{max} (flujo másico máximo que entra al filtro), W_{RET} (flujo másico total entra/sale de la torta).

4.4.2 Temperatura y Presión en la tela

El proceso de filtrado es un proceso de separación que no lleva flujos de calor asociados salvo las pequeñas pérdidas hacia el exterior. En el modelo se han despreciado esas pérdidas y se ha supuesto que el proceso isotérmico.

La presión en la tela que tiene que vencer el jugo para atravesarla va aumentando con el espesor de la torta que se va formando. Esta dependencia se ha modelado con un factor de corrección de tipo exponencial. En la etapa de descompresión y descarga de las tortas, la presión en la tela toma el valor definido para ese proceso.

$$P_{Tela} = (k[1] + k[2]) \cdot [P_O + (1 - \exp(-esp \cdot f_{presion}))] + k[3] \cdot P_F \quad (7)$$

donde: esp (espesor de la torta), $f_{presion}$ (factor de corrección), k (parámetro que fija los cambios de etapa), P_F (presión en la etapa de descompresión), P_O (presión inicial), P_{TELA} (presión en la tela)

4.2 DEPÓSITO DE SOPLADO

El depósito de soplado es un depósito al que entra jugo en la primera etapa del ciclo y que después vuelve al filtro para desprender las tortas. Si la cantidad de jugo que entra al depósito supera su capacidad, este rebosa recirculándose al depósito de jugo turbio que alimenta los filtros.

El modelo de este equipo se ha hecho en base a las ecuaciones de conservación considerando que es un depósito con una entrada y una salida situadas en la base del mismo y una salida por rebose.

4.3 CONO 1

El cono1 es un elemento intermedio en el que se recogen las tortas de filtración hasta que pueden pasar al cono2 tras la descarga de los lodos del ciclo anterior. El modelo de este equipo se ha hecho en base a las ecuaciones de conservación suponiendo que se comporta como un tanque agitado con una entrada en la parte superior, una salida en la parte inferior y una salida por rebose situada a cierta altura

de la base. Para simplificar el modelo, la geometría de este elemento se ha asimilado a un cilindro.

El flujo de salida por rebose se produce cuando la altura de lodo acumulada en el cono supera la altura a la que se encuentra dicha salida. Además hay que tener en cuenta la temporización del filtro, es decir la apertura y cierre de la válvula de nivelación que está colocada en esa salida.

$$W_{salida2\ cono1} = vN_ON \cdot 1000 \cdot \max(0, h - z_2)^{1.5} \quad (8)$$

El flujo de salida de lodo por el fondo de cono se ha calculado en función de la masa restante que va quedando en el mismo:

$$W_{salida1\ cono1} = \max(0, f_{descarga} \cdot masa/1.) \quad (9)$$

La presión en la base del cono es la correspondiente a la superficie más la carga de presión correspondiente a la columna de líquido.

$$P_{salida1\ cono1} = P + \rho \cdot g \cdot 10^{-5} \cdot (h - (z_1 - z_{fondo})) \quad (10)$$

en estas ecuaciones: ρ (densidad del lodo), $f_{descarga}$ (factor de corrección), g (gravedad), h (altura de lodo en el cono1), masa (masa acumulada en el cono1), P (presión), vN_ON (parámetro apertura/cierre válvula nivelación), W (flujo másico total de cada corriente), z_1 , z_2 , z_{fondo} (altura de las salidas y el fondo del cono).

4.4 CONO 2

Al cono 2 entra el lodo procedente del cono 1 y en él queda acumulado hasta su descarga en el siguiente ciclo de filtración. El modelo de este equipo se ha hecho en base a las ecuaciones de conservación, asimilando su geometría a un cilindro, para simplificar el modelo, con una entrada en la parte superior y una salida en la parte inferior.

Para el cálculo de la concentración en el momento de la descarga del lodo hay que tener en cuenta la sedimentación de los componentes sólidos (impurezas precipitadas, impz_p; óxido de calcio, CaO; carbonato cálcico, CaCO₃). Para modelar este fenómeno, cuando entra el lodo en el cono, se asignan la concentración de entrada a una variables internas 'C_int[j]' y el volumen de lodo que entró al volumen de ocupación del cono 'V2'.

```
WHEN (llenado==1.) THEN
  FOR (j IN ld_mix)
    C_int[j] = f_in.C[j]
  END FOR
END WHEN
WHEN (Fin_ciclo==1.) THEN
  V2 = V
  a=1.
END WHEN
```

En el momento de la descarga, la concentración de salida de estos tres componentes debe ser máxima e ir disminuyendo conforme va saliendo todo el lodo acumulado, de forma que en los últimos instantes de la descarga, la densidad del lodo sea muy similar a la del jugo.

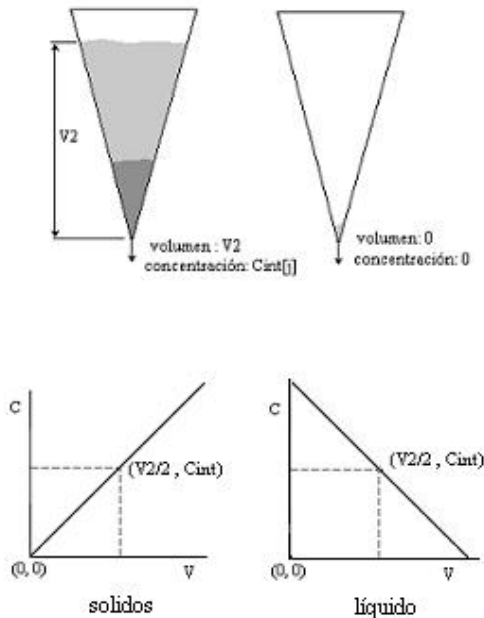


Figura5. Distribución de concentración en el cono 2 en el momento de la descarga del lodo

Para simular este fenómeno se ha hecho una simplificación importante del mismo y se ha considerado que existe una distribución lineal de la concentración con respecto a la altura, y que la concentración a mitad de altura (ó volumen) corresponde a las concentración de entrada del lodo desde el cono 1. (figura 5)

De esta forma, la concentración en el momento de la descarga viene dada por:

- Para los sólidos

$$C[j]_{salida} = (C_{int}[j] \cdot 2 / V2) \cdot V \quad (11)$$

- Para el líquido restante:

$$C[j]_{salida} = (C_{int}[j] \cdot 2) - (C_{int}[j] \cdot 2 / V2) \cdot V \quad (12)$$

donde: C (concentración), C_{int} (concentración de entrada al cono2), V (volumen de ocupación del cono2), V2 (volumen inicial ocupado en el cono2).

4.5 VÁLVULAS

Las válvulas existentes en el filtro permiten la temporización del mismo para la realización del ciclo de filtración.

El flujo que pasa a través de una válvula es proporcional a la raíz de la diferencia de presiones a los extremos de la misma (Bernouilli).

$$W = v_{ON} \cdot k \cdot \sqrt{\max(10^{-10}, P_{entrada} - P_{salida})} \quad (13)$$

donde: k (constante de proporcionalidad), P (presión), v_{ON} (parámetro apertura/cierre de la válvula), W (flujo másico a través de la válvula).

5 DESARROLLO DEL MODELO EN ECOSIM

Una vez que se tiene el modelo matemático, hay que traspararlo a Ecosim. Para ello se crean los componentes sencillos ya mencionados que después se unen en un componente global 'filtro'.

Además de los componentes que representan los elementos del filtro, se han tenido que desarrollar una serie de librerías generales, que incluirían:

- especies químicas y sus propiedades físicas y químicas
- puertos
- elementos de flujo: tuberías, bombas, válvulas, ...
- elementos de control: reguladores, medidores, ...
- elementos básicos de proceso: cambiadores de calor y depósitos.

Como ejemplo de estas librerías se presenta a continuación el código correspondiente al puerto de jugo generado para esta sección de depuración.

```
-----
--- Nombre del Puerto: jugo_depurado.
--- Descripción: Puerto para JUGO o LODO en sección de
DEPURACIÓN.
```

```
-----
-- simple=TRUE --> no se especifican impurezas
-- simple=FALSE --> se especifica impurezas
-- ld=TRUE --> el flujo es de lodo
-- ld=FALSE --> el flujo es de jugo
-----
```

```
PORT jugo_depurado
  (SET_OF(Chemical)Mix,
   BOOLEAN simple,BOOLEAN ld)
```

```
SUM REAL W RANGE 0.,Inf "Flujo másico (Kg/s)"
SUM IN REAL Wi[Mix] RANGE 0.,Inf "Flujo
másico de cada componente (Kg/s)"
EQUAL OUT REAL C[Mix] RANGE 0.,1.
  "Concentraciones (% 1 en peso)"
EQUAL REAL P RANGE 0.,Inf "Presión (bar)"
EQUAL OUT REAL T RANGE 0.,Inf
  "Temperatura (°C)"
```

```

REAL H "Entalpía específica KJ/Kg"
SUM IN REAL f_energ "Flujo de entalpía (KJ/s)"
REAL Pol RANGE 0.,1. "Polaridad en %1 en peso"
REAL Pureza RANGE 0.,1. "Pureza en %1 en peso"
REAL Brix RANGE 0.,100. "Grados Brix en %100
en peso"
REAL Rho RANGE 0.,Inf "Densidad (Kg/m^3)"
REAL F
REAL impz_dtas RANGE 0.,1. "impurezas disueltas
totales(%1 en peso)"
REAL solidos RANGE 0.,1. "fracción de sólidos
totales(%1 en peso)"

```

CONTINUOUS

```

I = SUM (j IN Mix; C[j])
EXPAND(j IN Mix EXCEPT setofElem(Mix,1))
  Wi[j] = C[j] * W
W = SUM(j IN Mix; Wi[j])
Pureza = zona(Pol,max((Brix/100.),0.01),0.)
Pol = C[azucar]
f_energ = W * H
W = F * Rho
EXPAND(simple==TRUE) impz_dtas = C[impz]

```

```

EXPAND(simple==FALSE)
  impz_dtas = C[proteinas] + C[amidas] \
  + C[az_inv] + C[otros]

```

```

solidos = solidos_jugoDepurado(Mix,C,ld)
Brix = Brix_jugoDepurado(Mix,C,impz_dtas,ld)
H = entalp_jugoDepurado(Mix,T,C,Brix,Pureza,ld)
Rho = den_jugo(T,Brix,Pureza)

```

ENDPORT

6 COMPONENTE FILTRO

El filtro es un componente compuesto por todos los componentes simples vistos anteriormente. A dicho componente se le añade además las ecuaciones correspondientes a la temporización del ciclo de filtración.

6.1. DEFINICIÓN COMPONENTE

En las llamadas a los componentes que forman el filtro, hay que especificar los parámetros y datos que sean necesarios para particularizarlo al caso de estudio.

A algunos de los parámetros se les da valor en la llamada a cada componente y a otros se les asigna el parámetro correspondiente definido en el componente unión, de forma que tomen valor automáticamente cuando se da valor a los parámetros del filtro.

En cuanto a los datos, a algunos se les ha asignado el valor de variables o datos que se han definido en el componente unión para facilitar la particularización y en otros casos, a esos datos (principalmente geometrías) se les da un valor en la llamada a cada componente para evitar la repetición excesiva de variables. Estos datos deben ser luego considerados como variables en la realización de la partición para poder darles el valor apropiado a cada caso.

6.2. TEMPORIZACIÓN

La temporización del ciclo de filtrado se consigue con una serie de sentencias en la parte discreta del modelo.

Esta temporización permite fijar el estado de las válvulas en cada momento del ciclo (ver tabla 2), así como los valores de los parámetros que indican los cambios de etapa. Ambos fenómenos se modelan con sentencias de tipo ZONE.

<i>Estado de las válvulas durante el ciclo</i>						
<i>Válvula</i>	<i>Etapas válvula abierta</i>					
	1	2	3	4	5	6
v.alimentación VA	x	x	x			
v.descompresión VD				x	x	x
v.extracción VE				x	x	
v.filtración VF		x	x			
v.nivelación VN					x	x
v.recirculación VRe				x	x	x
v.recirculacion VRs	x					

Tabla 2. Estado de las válvulas durante el ciclo

6.3 CÓDIGO DEL COMPONENTE

A continuación se muestra como quedaría finalmente el componente 'filtro'

```

-----
----- FILTRO -----
-----
COMPONENT Filtro_new_F IS_A cicloFiltro_new_F
  (SET_OF(Chemical) jug_mix, SET_OF(Chemical) ld_mix,
  BOOLEAN simple,INTEGER n_fallo1, INTEGER n_fallo2)

PORTS
  IN analog_signal s_in
  IN jugo_depurado (Mix=jug_mix,
  simple=simple, ld=FALSE) jugo_in
  OUT jugo_depurado (Mix=jug_mix,
  simple=simple, ld=FALSE) jugo_out_ftr
  OUT jugo_depurado (Mix=jug_mix,
  simple=simple, ld=FALSE) jugo_out_rec
  OUT jugo_depurado (Mix=ld_mix,
  simple=simple, ld=TRUE) jugo_out_niv
  OUT jugo_depurado (Mix=ld_mix,
  simple=simple, ld=TRUE) lodo_out

DATA
  REAL t_espera = 0. "tiempo de espera (s)"
  REAL t_ini "tiempo comienzo ciclo"
  REAL ON = 1. "parámetro: filtro funcionando"
  REAL Po = 1.5 "presión inicial en tela del filtro"
  REAL Pf = 1.1 "presión en la descompresión"
  REAL P0 = 1.
  REAL Wmax = 43. "flujo máximo entra filtro (kg/s)"
  REAL f_esp = 50. "factor corrección espesor torta filtración"

DECLS
  INTEGER ciclo "nº de ciclos realizados"
  BOOLEAN New_ciclo "parámetro comienzo de un ciclo"
  REAL Fin_ciclo "parámetro indica final de ciclo"
  INTEGER paso "pasos apertura/cierre válvulas"
  REAL etapa_tela "parámetro etapa tela del filtro"
  REAL kk[3] "parámetro de etapa en tela del filtro"
  REAL descarga_cono1 "parámetro paso lodo cono1 a cono2"
  REAL llenado_cono2 "parámetro llenado de cono 2"

```

```

REAL tf, aux      "tiempo transcurrido en cada ciclo"
REAL ff          "coeficiente eficacia filtrado (0-1)"
REAL ff2        "coeficiente simular colmatado (0-1)"
REAL t_p1,t_p2,t_p3,t_p4,t_p5,t_p6 "tiempo desde inicio ciclo"
REAL VA,VD,VE,VF,VN,VR_e,VR_s,VR "estado válvulas"

```

TOPOLOGY

```

depo_soplado (jugo_mix=jug_mix, simple=simple, ld=FALSE)
depo_soplado(Vmax=1.25, D=1.5, z_in1=0.)

```

```

tela_new_F(jug_mix=jug_mix, ld_mix=ld_mix, simple=simple)
tela(etapa=etapa_tela, Po=Po, Pf=Pf, k1=kk[1],
     k2=kk[2], k3=kk[3], Wmax=Wmax*ff2,
     f_esp=f_esp, ff=ff)

```

```

cono1_new_F(ld_mix=ld_mix, simple=simple)
cono1(descarga=descarga_cono1, vN_ON=VN)

```

```

cono2_new_F(ld_mix=ld_mix, simple=simple, C_dist=FALSE)
cono2(llenado=llenado_cono2,
      Fin_ciclo=Fin_ciclo)

```

```

valvula_filtro_new_F(jugo_mix=jug_mix, simple=simple,
ld=FALSE, tipo=1)
valv_VRe(v_ON=VR_e,k=372.677)

```

```

valvula_filtro_new_F(jugo_mix=jug_mix, simple=simple,
ld=FALSE, tipo=2)
valv_VRs(v_ON=VR_s,k=78.8266)

```

```

valvula_filtro_new_F(jugo_mix=ld_mix, simple=simple,
ld=TRUE, tipo=1)
valv_VE(v_ON=VE,k=996.)

```

```

valvula_filtro_new_F(jugo_mix=jug_mix, simple=simple,
ld=FALSE, tipo=2)
valv_VF(v_ON=VF,k=70.17)

```

```

CONNECT s_in      TO tela.s_in
CONNECT jugo_in   TO tela.jugo_in1
CONNECT tela.jugo_out2 TO valv_VRs.f_in
CONNECT valv_VRs.f_out TO depo_soplado.f_in1
CONNECT depo_soplado.f_out1 TO valv_VRe.f_in
CONNECT valv_VRe.f_out TO tela.jugo_in2
CONNECT tela.jugo_out1 TO valv_VF.f_in
CONNECT tela.lodo_out TO cono1.f_in
CONNECT cono1.f_out1 TO cono2.f_in
CONNECT cono2.f_out TO valv_VE.f_in
CONNECT valv_VE.f_out TO lodo_out
CONNECT depo_soplado.f_out1_rebose TO jugo_out_rec
CONNECT cono1.f_out2 TO jugo_out_niv
CONNECT valv_VF.f_out TO jugo_out_ftr

```

INIT

```

aux = 0.
tf = 0.
ciclo = 1
New_ciclo = TRUE   AFTER t_ini
descarga_cono1 = 0.
llenado_cono2 = 0.

```

DISCRETE

```

WHEN (ON==1 AND New_ciclo==TRUE) THEN
  New_ciclo=FALSE
  aux = TIME
  paso = 1
  paso = 2   AFTER t_p1
  paso = 3   AFTER t_p2
  paso = 4   AFTER t_p3
  paso = 5   AFTER t_p4
  paso = 6   AFTER t_p5
  paso = 7   AFTER t_p6
  etapa_tela = 1.
  etapa_tela = 2. AFTER t_p1
  etapa_tela = 3. AFTER t_p3
  descarga_cono1 = 1. AFTER t_p6+2.

```

```

descarga_cono1 = 0.   AFTER t_p6+15.
llenado_cono2 = 1.   AFTER t_p6+3
llenado_cono2 = 0.   AFTER t_p6+4
ciclo = ciclo + 1   AFTER t_p6
Fin_ciclo = 1.     AFTER t_p6+20
Fin_ciclo = 0.     AFTER t_p6+21
New_ciclo = TRUE   AFTER t_p6 + t_espera

```

END WHEN

CONTINUOUS

```

---- tiempo desde inicio del ciclo hasta cada paso
t_p1 = t1_1
t_p2 = t_ciclo1 - t3_1 - t2_1
t_p3 = t_p2 + t2_1
t_p4 = t_p3 + t5_1
t_p5 = t_p3 + t4_1
t_p6 = t_ciclo1
---- estado de las válvulas
VA = ZONE(paso==1 OR paso==2 OR paso==3) 1.
OTHERS 0.
VD = ZONE(paso==4 OR paso==5 OR paso==6) 1.
OTHERS 0.
VE = ZONE(paso==4 OR paso==5) 1.
OTHERS 0.
VF = ZONE(paso==2 OR paso==3) 1.
OTHERS 0.
VN = ZONE(paso==5 OR paso==6) 1.
OTHERS 0.
VR_e = ZONE(paso==4 OR paso==5 OR paso==6) 1.
OTHERS 0
VR_s = ZONE(paso==1) 1.
OTHERS 0.
VR = ( VR_e + VR_s)*1.
---- etapas en la tela del filtro
kk[1] = ZONE(etapa_tela==1.) 1.
OTHERS 0.
kk[2] = ZONE(etapa_tela==2.) 1.
OTHERS 0.
kk[3] = ZONE(etapa_tela==3.) 1.
OTHERS 0.
---- tiempo transcurrido en cada ciclo
tf = ZONE(ON==1 AND TIME>=t_ini)
      (TIME - aux)
OTHERS 0.
---- fallos
ff = ZONE (abs(fallo[n_fallo1])<0.000001) 1.
      OTHERS fallo[n_fallo1]/100.
ff2 = ZONE (abs(fallo[n_fallo2])<0.000001) 1.
      OTHERS fallo[n_fallo2]/100.
END COMPONENT

```

6.4. PARTICIÓN Y EXPERIMENTO

No es posible realizar un experimento directamente con el componente en solitario, ya que es necesario parametrizarlo. Hay que definir otro componente en el que aparezca la llamada al filtro.

COMPONENT prueba_filtro

```

TOPOLOGY
Filtro_new_F (tipo=1, jug_mix=jugoDep_simple ,
              ld_mix=lodo_simple, simple=TRUE,
              n_fallo1=429 , n_fallo2=430)
filtro1(t_ini=0., ON=1., t_ciclo1=240., t1_1=30.,
        t2_1=5, t3_1=30., t4_1=6., t5_1=2.)
END COMPONENT

```

Las variables que deben fijarse como condiciones de contorno para realizar un experimento son las que definen las corrientes de entrada y salida y que corresponden a los puertos libres. Además deben

fijarse como variables de contorno los datos que interese modificar para caracterizar el filtro. De esta forma, las variables de contorno serán:

- composición y temperatura de la corriente de jugo turbio que entra al filtro
- señal de control del regulador de nivel del depósito de jugo turbio
- constantes de proporcionalidad de las válvulas
- geometría de los elementos que componen el filtro
- presiones de los elementos que componen el filtro

7 RESULTADOS

Como ejemplo de los resultados que se obtienen de la simulación, se ha representado en las figuras 6 y siguientes el comportamiento típico discontinuo de un filtro.

En la figura 6 aparece el secuenciamiento de las válvulas que permite la temporización de los ciclos de filtrado.

En la figura 7 aparece la acumulación de masa en cada uno de los elementos que componen el filtro: tela, depósito de soplado, cono1 y cono2.

En la figura 8 aparecen los flujos de entrada y salida del filtro: jugo turbio que entra desde el depósito de

soplado, jugo filtrado que rebosa del depósito de soplado y jugo de nivelación, (ambos se recirculan al depósito de soplado), y finalmente jugo filtrado y lodos que pasan a las siguientes etapas del proceso.

En la figura 9 aparece la variación que se produce en la densidad de los lodos durante su descarga debido a la distribución de los lodos en el interior del cono.

En la figura 10 aparecen los flujos de entrada y salida al depósito de soplado.

La filtración, al ser un proceso batch, presenta serias dificultades en su simulación. Los fenómenos que tienen lugar son no lineales y las condiciones de operación varían considerablemente con el tiempo (ciclos de filtrado). Esto implica numerosos cambios en el modelo de cálculo durante el transcurso de la simulación que suponen una gran complejidad numérica y matemática que crece exponencialmente al unir varios filtros e ir completando la sección de depuración.

El modelo de un filtro incluye 463 ecuaciones y 463 variables (26 variables de estado). Para realizar un experimento es necesario fijar 28 variables como condiciones de contorno.

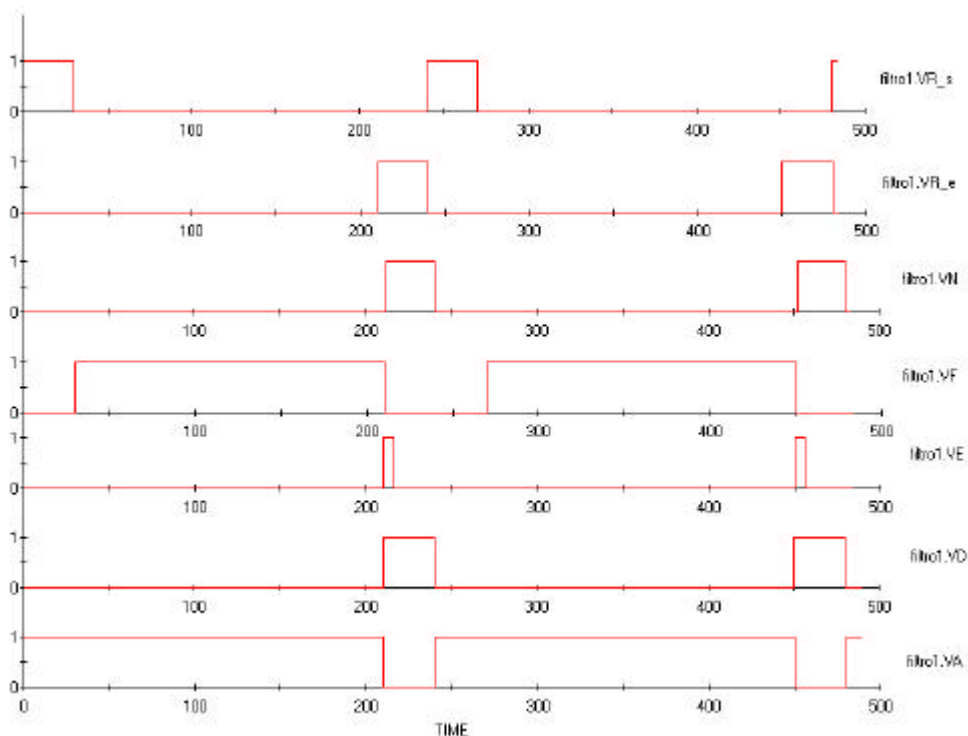


Figura 6: Estado de las válvulas (abierta: 1 ; cerrada: 0) durante los ciclos de filtración.

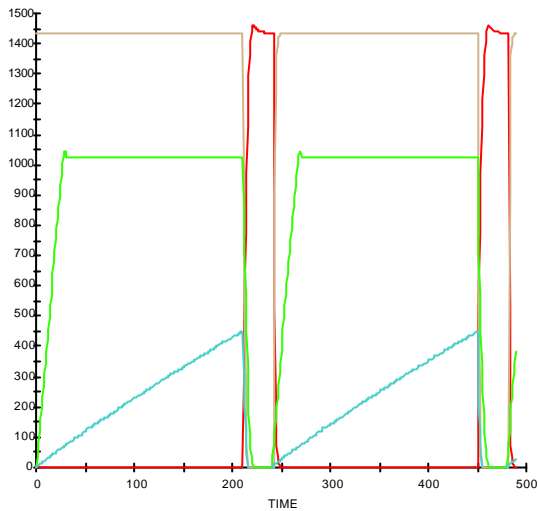


Figura 7: Masas acumuladas en cada elemento del filtro (tela: azul; depo_soplado: verde; cono1: rojo; cono2: marrón)

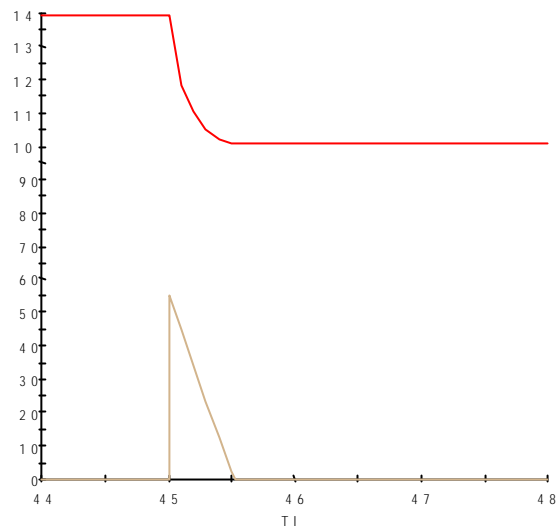


Figura 9: Detalle de la variación de densidad en la descarga del filtro (densidad: rojo; flujo descarga lodos: marrón)

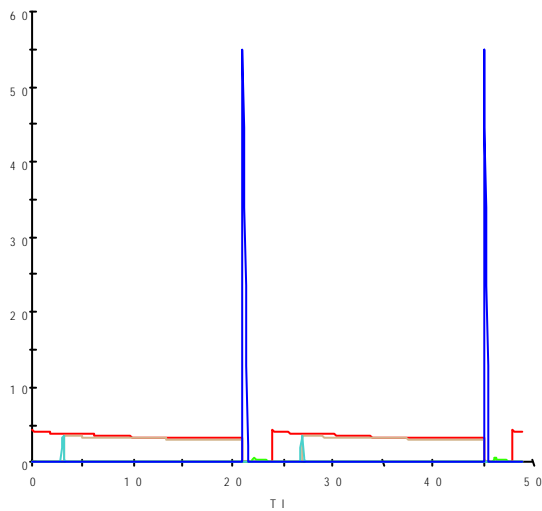


Figura 8: Flujos de entrada y salida del filtro durante el ciclo (jugo turbio entra: rojo; jugo filtrado sale: marrón; jugo sale por nivelación: verde; jugo rebosa del depósito soplado: azul claro; lodo sale: azul oscuro)

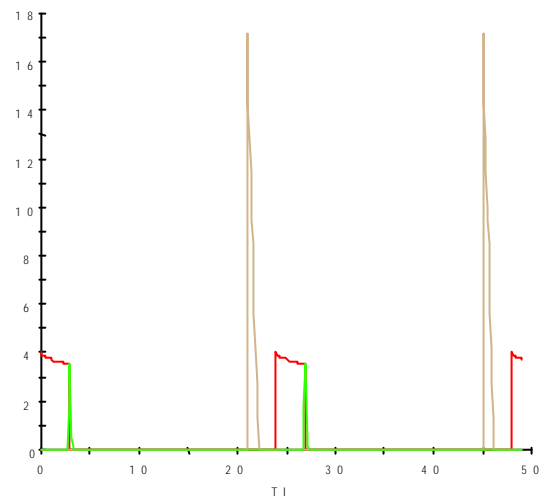


Figura 10: Flujos de entrada y salida del depósito de soplado (flujo de entrada: rojo; flujo salida por rebose: verde; flujo salida para descarga de tortas: marrón)

8 CONCLUSIONES

El modelo construido cumple los requisitos fijados y representa correctamente el comportamiento real del sistema.

La herramienta de simulación utilizada, Ecosimpro, ha facilitado el modelado por elementos más simples cuya unión nos permite simular un sistema complejo.

La resolución de las ecuaciones matemáticas que representan el modelo físico, y que han condicionado la elección del modelo teórico, ha sido el problema fundamental que se ha planteado en la simulación de los filtros.

El componente final obtenido puede ser reutilizado simplemente cambiando los parámetros que lo definen (geometría y condiciones de operación)

El uso de estos modelos en el entrenamiento de operarios es muy útil, ya que no es necesario conocer del código con que se han desarrollado dichos modelos.

Apéndice

Componentes de otras librerías que se han utilizado

Librería PUERTOS	
<i>Componente</i>	<i>Descripción</i>
analog_signal	Puerto de señal analógica
jugo_depurado	Puerto para jugos o lodos en la sección de depuración

Librería ELEMENTOS DE FLUJO	
<i>Componente</i>	<i>Descripción</i>
valvula_filtro_new_F	Válvula de jugo depurado

Librería ELEMENTOS BÁSICOS DE PROCEOS	
<i>Componente</i>	<i>Descripción</i>
deposito_jugoDepurado	Depósito con una entrada y una salida

Referencias

- [1] Z. Bubník, P. Kadlec, D. Urban, M. Bruhns (1995) "Sugar Technologists Manual: chemical and physical data for sugar manufacturers and users" 8th edition. Bartens.
- [2] McGinnis (1971) "Beet-Sugar Technology" 2d Edition. Beet sugar Development Foundation.
- [3] P.W. van der Poel, H. Schiweck, T. Schwart (1998) "Sugar Technology: Beet and Cane Sugar Manufacture" 8th edition. Bartens.