

MODELADO Y SIMULACIÓN DE LA SECCIÓN DE DIFUSIÓN DE UNA INDUSTRIA AZUCARERA

Merino Gómez, Alejandro

Centro de Tecnología Azucarera. Universidad de Valladolid

C/ Real de Burgos. Edificio Alfonso VIII. Planta baja s/n. 47011. Valladolid. España

Teléfono: 983 42 35 63. FAX: 983 42 36 16. E-mail: alejandro@cta.uva.es

Resumen

Se ha desarrollado en EcosimPro el modelo correspondiente a la sección de difusión de una industria azucarera. En esta parte del proceso interviene un gran número de operaciones básicas en ingeniería que tienen además dinámicas muy diferentes, por lo que el modelo es de una alta complejidad. Podemos destacar el modelado del difusor, el modelo matemático de este equipo, por sus características físicas y de operación, es un modelo en derivadas parciales por lo que se requiere realizar una discretización del mismo.

Palabras Clave: Modelado, Simulación, sistemas distribuidos, transferencia de materia y energía.

1 INTRODUCCIÓN

En este artículo se va a hacer un breve recorrido por los modelos de los distintos equipos que componen la sección de difusión de una azucarera haciendo hincapié en cómo se modela un sistema cuyo modelo matemático de comportamiento viene representado por ecuaciones diferenciales en derivadas parciales.

Se hará primero una descripción del sistema físico, para facilitar la comprensión del proceso.

Se explicará luego la metodología seguida para transformar el modelo en EDPs a un modelo en ODEs.

Se aplicará esto a un caso concreto como es un difusor de una industria azucarera y se justificará la utilidad de la simulación para este tipo de sistemas.

Se presentarán también el resto de los modelos de los diferentes equipos.

En último lugar se presentarán los resultados obtenidos mediante la simulación con ECOSIM.

2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

La difusión es una de las primeras etapas en el proceso de producción de azúcar de remolacha. En

esta etapa se pretende extraer la máxima cantidad de azúcar de la remolacha previamente lavada y cortada en tiras finas, llamadas cosetas.

Para llevar a cabo la extracción las cosetas se ponen en contacto con agua caliente en contracorriente.

Un buen diseño de esta etapa es fundamental ya que es necesario extraer la máxima cantidad de azúcar posible utilizando la menor cantidad de agua, para ello se utiliza un método de extracción en contracorriente en el que el agua con menor concentración de azúcar se pone en contacto con las cosetas con menor concentración de azúcar de forma que el gradiente de concentración, que fuerza la transferencia de materia, se maximiza en todo momento.

Este tipo de operaciones se llevan a cabo en equipos llamados difusores. Aunque los principios físicos que rigen el proceso son los mismos, existen distintos tipos de difusores con distintas características de operación. En este caso se va a utilizar el tipo de difusor RT ampliamente utilizado en España.

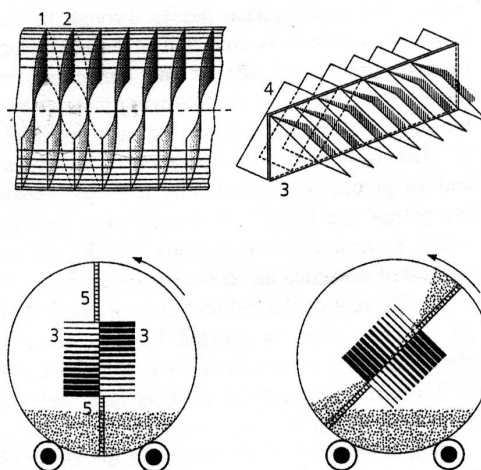


Figura 1. Elementos constitutivos de un difusor RT 2. [1]

1 y 2 Platos helicoidales que forman dos canales separados para el jugo; 3 Placa transversal; 4 Pasajes para las cosetas; 5 Rejillas transversales.

Este tipo de difusor consiste en unos grandes tambores rotativos, separados en celdas por una hélice enganchada a la superficie interior. Mientras el tambor con la hélice gira, el jugo, que permanece en el fondo, es transportado desde la cabeza hasta la cola del difusor. De esta forma es la celda la que se mueve, aunque es más conveniente considerar que cada celda como la localización de cada vuelta de la hélice. Si la rosca tiene 30 vueltas, hará falta que el tambor gire 30 veces para que el jugo vaya de un lado a otro del difusor y se considera que hay 30 celdas en el difusor. Fijadas al cilindro existen rejillas que con el giro del tambor arrastran las cosetas hasta que deslizan y caen en la siguiente celda. De esta forma el jugo y las cosetas avanzan en direcciones opuestas.

Estos difusores son equipos muy grandes (hasta 45 m de longitud y 7 m de diámetro) y muy caros, por lo que la mayoría de las fabricas sólo disponen de uno y son además indispensables en el proceso de producción del azúcar por lo que resulta muy difícil el trabajo empírico con este tipo de sistemas. Esto hace especialmente atractiva la simulación para este tipo de sistemas.

En una primera zona del difusor las cosetas son arrastradas por unas cestas hacia el interior, mientras que el jugo pasa a través de los orificios de las cestas hacia el tanque de jugo de circulación. Este jugo de salida del difusor se hace circular a través de un cambiador de calor para luego ponerse en contacto con las cosetas en un equipo especial llamado TEJC. En este equipo las cosetas son precalentadas antes de introducirse en el difusor.

Las cosetas agotadas que salen del difusor son llevadas en un cinta transportadora hacia la sección de prensado. Donde se obtiene la pulpa prensada y el agua de prensado, este agua se recircula al proceso de extracción. A la entrada del proceso de extracción se hace un filtrado al jugo de prensado para eliminar los restos de pulpa en suspensión que pueda arrastrar y se lleva a un tanque de espera desde el que se bombea a la zona de calentamiento, allí se precalienta desde 63 hasta 72 °C y cae a un depósito desde el que con un caudal de salida constante se lleva al difusor. Por otro lado al proceso se le introduce agua de aporte que es calentada en dos cambiadores y llevada a un depósito en el que se ajusta el pH, a continuación se introduce en el difusor. Las dos corrientes líquidas que entran al difusor son las encargadas de extraer el azúcar de las cosetas que entran por el otro extremo.

El jugo frío que sale del TEJC necesita acondicionarse antes de llevarse al precalentado, para ello pasa primero por un desarenador que elimina los restos de arena y luego por un despulpador que elimina los restos de pulpa en suspensión. El jugo se lleva a un tanque de espera desde el que se bombea el jugo hacia los precalentadores que hacen que el jugo alcance la temperatura de 69 °C necesaria para la depuración.

3 DISCRETIZACIÓN DE UN SISTEMA DE PARÁMETRO DISTRIBUIDO

Los sistemas de parámetro globalizado son aquellos en los que las propiedades y las variables de estado del sistema pueden considerarse homogéneas a lo largo del mismo. En realidad todos los sistemas son distribuidos ya que siempre existen variaciones espaciales de las propiedades o variables.

Sin embargo estas variaciones son con frecuencia pequeñas y pueden ignorarse, podemos considerar entonces el modelo como de parámetro globalizado.

Hay por otro lado otra serie de sistemas en los que la distribución espacial de las propiedades exige la utilización de un modelo de parámetro distribuido. Suelen ser sistemas en los que la relación longitud diámetro es muy alta y por tanto la dependencia de las variables con la longitud es muy importante. Este es el caso de un difusor rotatorio de una azucarera.

Las ecuaciones matemáticas que modelan los procesos representados por un modelo de parámetro distribuido son de la forma:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial (v_z \cdot T)}{\partial z} = \text{Transporte} + \text{Generación} \quad (1)$$

El problema es que Ecosim no soporta ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, por tanto hacemos una transformación del modelo de parámetro distribuido mediante la discretización con respecto a una de las variables, se obtiene una ecuación de la siguiente manera:

$$\frac{dT_n}{dt} = v_z \cdot \frac{(T_{n-1} - T_n)}{\Delta z} + \text{Transporte} + \text{Generación} \quad (2)$$

Esto equivale a una serie de modelos globalizados conectados entre sí [2].

La conexión entre los múltiples modelos de parámetro globalizado se realiza de forma que la salida de un elemento coincide con la entrada del siguiente con un determinado retardo.

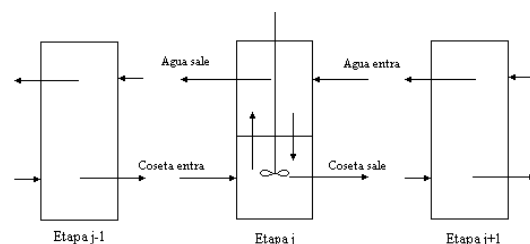


Figura 2. Conexión de múltiples modelos de parámetro globalizado.

Por tanto dividimos el difusor en elementos, el número de estos es una cuestión de compromiso entre la exactitud en el cálculo (cuanto mayor sea el número de elementos mas se acerca la solución a la obtenida mediante el parámetro distribuido), y el tiempo de simulación.

Se ha tomado un número de elementos tales que la solución final no varía de forma significativa por el hecho de añadir o quitar un elemento.

La utilización de esta técnica resulta ser aproximadamente equivalente a la utilización de diferencias finitas en la resolución del modelo.

4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO DEL DIFUSOR

El difusor es un elemento difícil de modelar ya que los fenómenos que ocurren en el interior del difusor son de naturaleza muy compleja, existen mecanismos simultáneos de transferencia de materia por difusión debida al gradiente de concentración, fenómenos de ósmosis inversa y fenómenos físicos de aplastamiento. Además la transferencia de materia y energía están relacionadas ya que la temperatura influye en la constante de difusión y la velocidad de difusión influye en la temperatura.

En lo que se refiere al transporte de materia se ha optado por simplificar al máximo y suponer que existe transporte de transferencia de materia debido sólo a la diferencia de concentraciones entre el jugo y la disolución.

A partir de lo explicado anteriormente suponemos el difusor dividido en 20 celdas iguales, en las que se produce transferencia de azúcar, de no azúcar y de agua.

Se supone también que:

Las celdas están conectadas de tal manera que la salida de una celda coincide exactamente con la entrada de la siguiente, según el sentido de flujo de cada fase.

En cada celda existe mezcla perfecta por lo que el valor de las variables a la salida será igual al valor de las variables en el interior de cada celda.

El jugo y las cosetas se mueven en contracorriente de manera ideal a lo largo de todo el difusor. No se considera dispersión axial.

Cada etapa está retardada con respecto a la anterior siguiendo un retardo de primer orden. El modelo de flujo es por tanto el de una batería de 20 tanques de mezcla perfecta en serie, entre los cuales se introduce un retardo de primer orden.

La variación de entalpía que sufre la coseta es debida en parte a la diferencia de temperatura, si es que existe, entre esta y el jugo y en parte a la transferencia de materia coseta/jugo.

El número de elementos diferenciales que existen se ha parametrizado mediante la constante "net" de manera que se pueden añadir o quitar elementos a voluntad. El primer y el último elemento están conectados al exterior mediante puertos de manera que las condiciones de entrada vienen impuestas por el entorno y las de salida vienen impuestas por el funcionamiento del difusor.

Un esquema del difusor sería el siguiente:

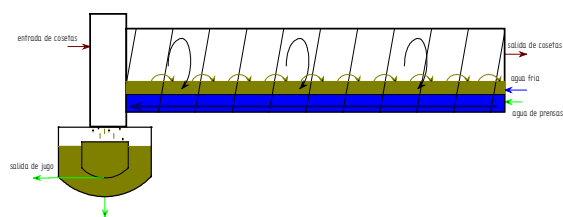


Figura 3. Esquema del difusor

Una descripción sencilla de operación sería que el agua de extracción entraría por el extremo de la derecha circulando hacia la izquierda extrayendo la sacarosa y otras sustancias no deseadas al ponerse en contacto con la coseta que circula en contracorriente.

5 MODELOS DE OTRAS OPERACIONES BÁSICAS

Se han desarrollado modelos de otras operaciones, estos modelos son:

- Bombas.
- Intercambiador Jugo / coseta.
- Tuberías.
- Cambiadores.
- Depósitos.

Además están modelados otro tipo de componentes necesarios para el control de la planta como son los controladores, medidores o indicadores.

Mediante la unión de todos estos elementos con el difusor podemos hacer un modelo de toda la sección de difusión. En la figura siguiente se muestra un esquema de esta sección.

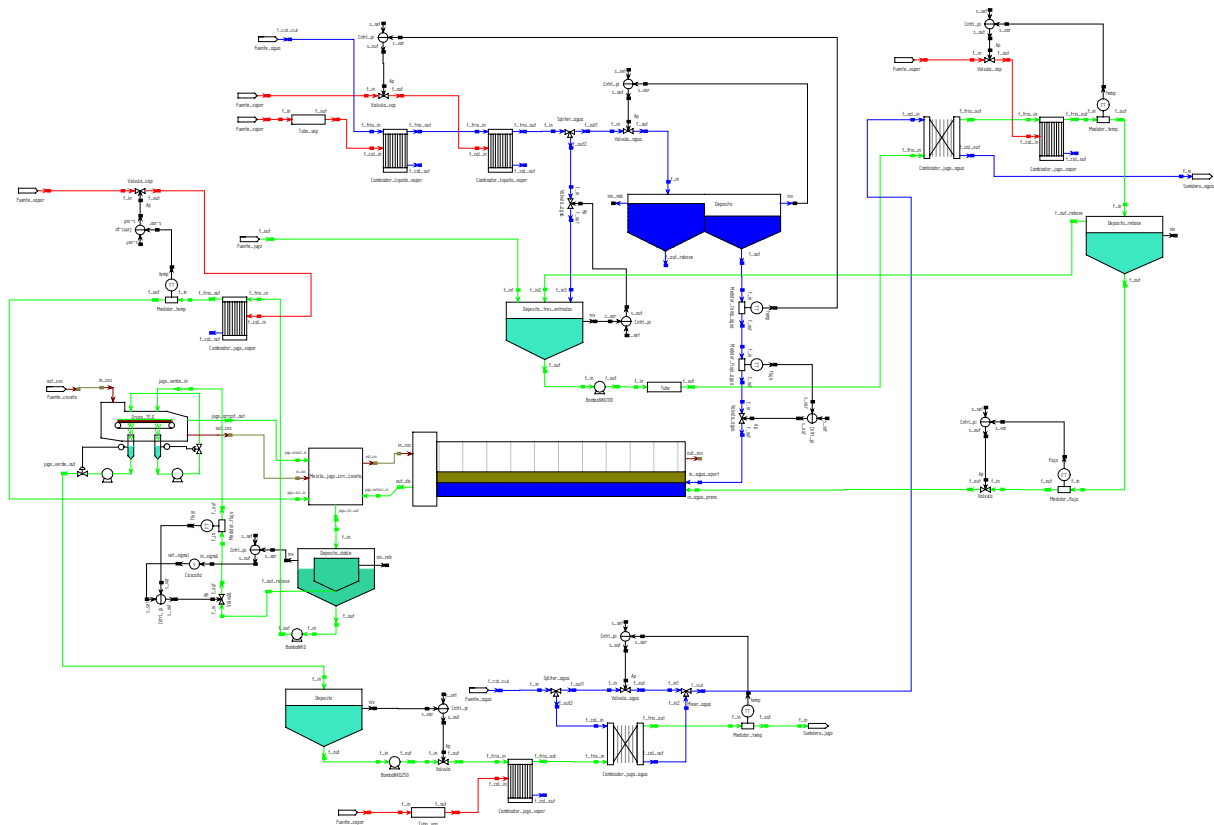


Figura 4. Esquema de la sección de difusión realizado con Smartsketch

6 SIMULACIÓN DINÁMICA DE LA SECCIÓN DE DIFUSIÓN

Vamos a ver a continuación cual es la respuesta del difusor ante distintas perturbaciones.

Para la simulación se ha utilizado un número de etapas igual a 20. Se escoge el número de elementos de manera que la solución final no varía de forma significativa por el hecho de añadir o quitar un elemento.

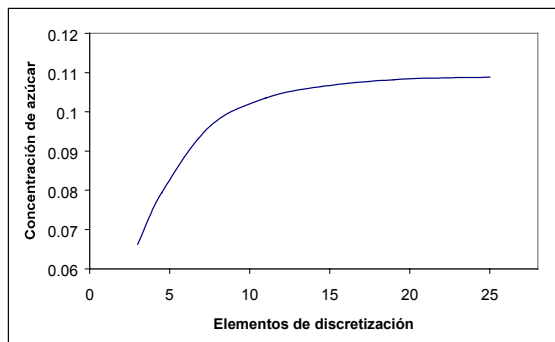


Figura 5. Optimización del número de puntos de discretización.

En primer lugar se han ajustado los parámetros del modelo para que las respuestas se ajusten a la realidad.

Con esto se simula el proceso y se realiza un análisis comparativo de los resultados obtenidos mediante la simulación y los datos reales de los que se dispone, en lo que a flujos máscicos y concentraciones se refiere.

Los valores para el jugo de extracción que se obtiene a la salida del difusor son:

Jugo salida		
Sustancia	% en peso simulación	% en peso teórico
Azúcar	13.65	13.86
No-azúcares solubles	1.77	1.77
Sustancia seca total	15.42	15.64
Contenido en agua	84.35	84.56
Masa salida	91.53	91.61

Tabla 1

Mientras que los valores para la pulpa agotada que sale del difusor son:

Jugo salida		
Sustancia	% en peso simulación	% en peso teórico
Azúcar	3.85	3.55
No-azúcares solubles	0.70	0.69
Marco	5.60	5.60
Sustancia seca total	10.15	9.84
Contenido en agua	89.84	90.16
Masa salida	60.68	60.75

Tabla 2

Para ver como evoluciona la concentración de azúcar se muestra a continuación el perfil de concentraciones de azúcar a lo largo del difusor en el jugo y en la coseta:

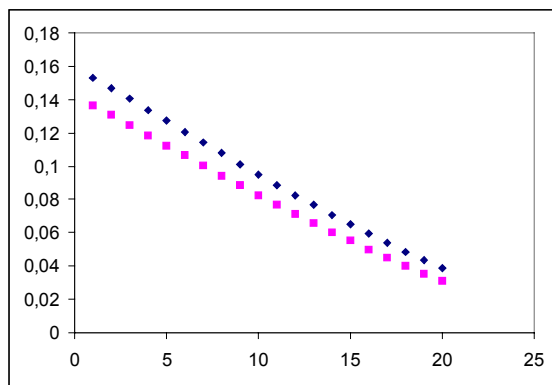


Figura 6

◆ Concentración de azúcar en el jugo en tanto por uno en peso vs. longitud discretizada del difusor.

■ Concentración de azúcar en la coseta en tanto por uno en peso vs. longitud discretizada del difusor.

En la figura 5 se puede observar el típico perfil en el caso de extracción en contracorriente, en el que la diferencia de concentraciones se mantiene mas o menos constante durante toda la extracción disminuyendo ligeramente a medida que la coseta se va empobreciendo en azúcar.

Vamos a ver como afecta a las concentraciones de azúcar en distintos puntos del difusor una variación en el caudal de agua de aportación que está entrando. Se varía el caudal del agua desde 24.20 hasta 32.40 kg/s. Se han representado los puntos de discretización 1, 5, 10, 15 y 20. Por defecto en los experimentos el eje de las x representa el tiempo en h.

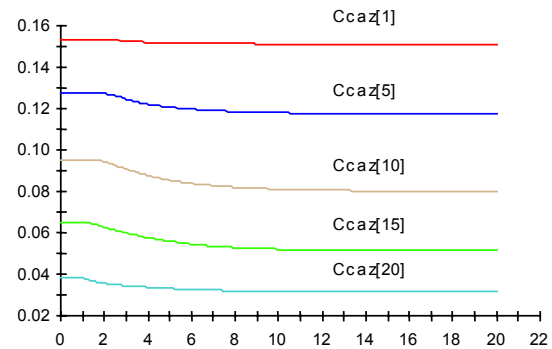


Figura 7

Puede observarse como nada mas producirse el salto la concentración de azúcar en el primer punto disminuye, para el resto de los puntos se produce el cambio con cierto retardo ya que están mas alejados del punto en el que se produjo la perturbación.

Puede observarse también como el modelo de flujo, si representamos la derivada de la concentración con respecto al tiempo.

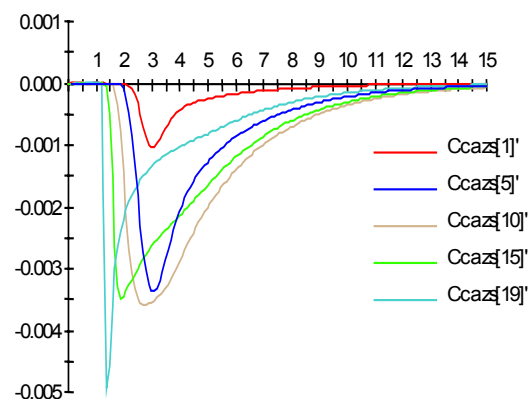


Figura 8

Puede verse como a medida que nos alejamos del punto de perturbación los picos se hacen, más bajos y más simétricos, lo que corresponde con el modelo que se obtiene si conectamos n tanques en serie, a medida que aumentamos el número de tanques ocurre esto mismo.

Veamos que ocurre si por un fallo en el calentador de cosetas esta entran a 15 °C en vez de 69 °C

Se puede observar en la figura 8 como la temperatura del jugo va disminuyendo lo largo del difusor al ponerse en contacto con la coseta fría.

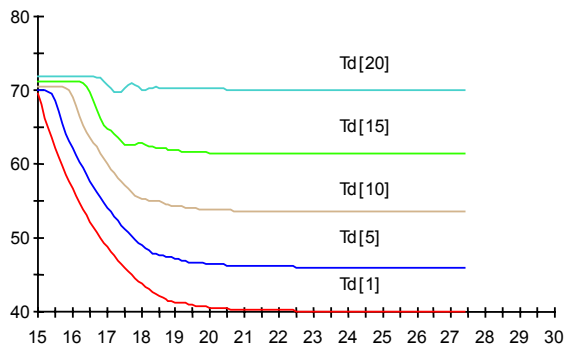


Figura 9

Vemos como al disminuir la temperatura la concentración de azúcar en la coseta aumenta sobretodo en las primeras etapas que es donde la temperatura es mas baja. Los sobrepicos que se producen son debidos a que se da un salto muy brusco en la temperatura, en la realidad estos saltos no se producen de esta forma por lo que la respuesta sería más suave.

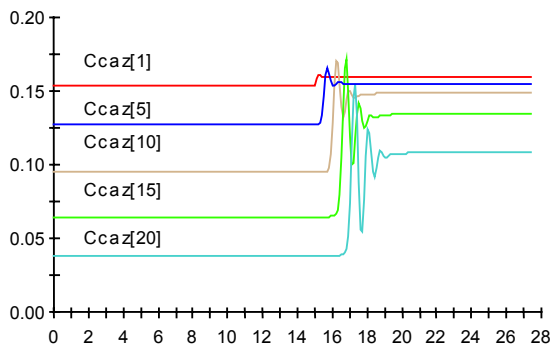


Figura 10

Se puede hacer análisis en tres dimensiones de lo que ocurre, en la figura 10 se muestra la variación en la concentración de azúcar con el tiempo y con la distancia al aumentar la cantidad de agua que entra al difusor.

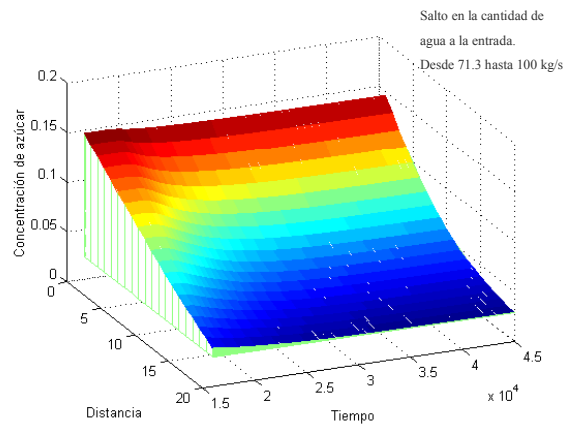


Figura 11

7 PUERTOS Y PROPIEDADES FISICAS

Para el desarrollo de estos componentes se han desarrollado una serie de librerías auxiliares de propiedades físicas y de puertos.

Como ejemplo de puertos se muestra aquí el puerto de jugo creado para comunicar la entrada y la salida de jugo del difusor con otros componentes.

PORT f_jugo (SET_OF(Chemical)Mix)

```

SUM REAL W "Flujo másico (Kg/s)"
SUM IN REAL Wi[Mix] "Flujo másico de cada
componente (Kg/s)"
EQUAL OUT REAL C[Mix] "Concentraciones (%1 en
peso)"
EQUAL REAL P "Presión (bar)"
REAL T "Temperatura (°C)"
EQUAL OUT REAL H "Entalpía específica KJ/Kg"
SUM IN REAL f_energ "Flujo de entalpía (KJ/s)"
REAL Pol "Polaridad en %1 en peso"
REAL Pureza "Pureza en %1 en peso"
REAL Brix "Grados Brix en %100 en
peso"
REAL Rho "Densidad (Kg/m^3)"
REAL F
EQUAL OUT REAL pH

```

CONTINUOUS

1 = 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]
Brix = 100 * (C[azucar]+C[no_azucar])
H = H_jugo(T,Brix,Pureza)
f_energ = W * H
Rho = Den_jugo(T,Brix,Pureza)
W=F*Rho

```

END PORT

Las propiedades físicas que se han incluido son:

- Jugo (Conductividad, densidad, viscosidad, presión de vapor, entalpía).
- Cosetas (Entalpía).
- Agua (Viscosidad, densidad, entalpía).

9 CONCLUSIONES

Actualmente el proyecto se encuentra en una etapa de validación. Algunos de los resultados ya han sido evaluados de manera satisfactoria, aunque existen algunas zonas pendientes de comprobación.

La simulación se muestra como una herramienta poderosa para distintas aplicaciones, como son el entrenamiento de operarios, la optimización económica, así como el estudio y diseño de estructuras de control adecuadas.

Dentro de la simulación el modelado orientado a objetos se ha mostrado muy útil ya que acorta los tiempos de desarrollo de modelos de manera considerable gracias a las capacidades de este tipo de lenguajes como son la reutilización o la herencia.

Agradecimientos

Este trabajo se enmarca dentro del proyecto “Simulación de factorías azucareras para optimización de proceso y entrenamiento de personal” (FEDER TAP 1FD97-1450) realizado en el Centro de Tecnología Azucarera de la Universidad de Valladolid. Agradecimientos a todas las personas implicadas en el mismo.

Referencias

- [1] Sugar Technology. Beet and Cane Sugar Manufacture.
P.W. van der Poel, H. Schiweck, T. Schwartz.
Ed. Bartens 1998
- [2] Análisis y simulación de procesos
David M. Himmelblau, Kenneth B. Bischoff
Ed. Reverté S.A. 1986.

- [3] Heat and Mass Transfer
Eckert, E. R. G. y Dake, R.M.
McGraw Hill 2ª ed 1959
- [3] Manual de energía para fábricas de azúcar
Tone Baloh, Enrique Wittwer
Ed Bartens, 2ª Edición
- [4] Beet-Sugar Technology
R. A. Mc Ginnis
Beet Sugar Development Foundation.
3d Edition
- [4] Beet-Sugar Technology
R. A. Mc Ginnis
Beet Sugar Development Foundation.
3d Edition