

Modelado y Simulación del Proceso de Producción del Azúcar

Merino A.*, Acebes L. F.**, Mazaeda R.**, de Prada C. **

**Centro de Tecnología Azucarera.*

Universidad de Valladolid. Edificio Alfonso VIII. 47011 Valladolid, España.

e-mail: alejandro@cta.uva.es

***Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática,*

Universidad de Valladolid, España.

e-mail: {felipe, prada}@autom.uva.es

Resumen: En este artículo se muestra una metodología para el desarrollo de librerías de modelos matemáticos dinámicos para la industria azucarera. Las especificaciones y requisitos de esta librería hacen necesaria la utilización del paradigma de modelado Modelado Orientado a Objetos Basado en Ecuaciones. Utilizando una herramienta que utiliza este paradigma se han desarrollado una serie de librerías de modelos, que contienen los elementos necesarios para la construcción del modelo conjunto de una fábrica azucarera completa. En este artículo se muestran los detalles constructivos más interesantes de algunas de éstas librerías, así como algunos de los problemas que se han abordado durante su desarrollo. Mediante la aplicación de los mecanismos de agregación que posee la herramienta de modelado utilizada, es posible la construcción del modelo de fábricas azucareras completas en base a la conexión de las distintas unidades de proceso que la componen. Las principales aportaciones de la librería desarrollada, respecto a otras herramientas y librerías existentes en la actualidad en el mercado, son el hecho de utilizar modelos dinámicos detallados de proceso y el que estos modelos incluyan anomalías y malfunciones. Esto ofrece una gran versatilidad en la utilización de la librería en aplicaciones como el diseño de controladores, los simuladores de entrenamiento o la utilización de los modelos como fuente de datos en herramientas de optimización en línea de procesos. Copyright © 2009 CEA.

Palabras Clave: Modelado de Procesos Continuos, Simulación de procesos, Industria Azucarera.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años las técnicas de simulación han alcanzado un nivel de madurez que ha provocado que su uso se haya extendido a campos muy diversos. Aun así, la simulación sigue siendo una herramienta poco utilizada en sectores productivos en los que esta no se hace imprescindible, ya sea porque la seguridad no es un factor crítico o porque no se aprecia un gran beneficio económico por la utilización de la misma.

El sector azucarero es uno de esos sectores. El proceso de producción de azúcar no presenta riesgos especialmente importantes, ya que en el mismo no intervienen productos peligrosos ni las condiciones de operación son extremas. Resulta además un proceso que se conoce desde muy antiguo, por lo que la operación del mismo ha ido mejorándose en base a la experiencia acumulada durante décadas, por tanto, no se esperan grandes beneficios resultantes de la optimización del proceso mediante técnicas de simulación.

La aparición en los últimos años de tecnologías que permiten la creación de librerías de objetos reutilizables, ha rebajado los costos del desarrollo de simuladores, por lo que su uso en aplicaciones no críticas empieza a ser viable. Algunas de las herramientas que utilizan estas tecnologías son los lenguajes de simulación orientados a objetos, que permiten la reutilización de código, el desarrollo de librerías y el modelado gráfico (Aström et al., 1998). Se está realizando además una importante labor en la estandarización y el desarrollo de interfaces comunes para integrar objetos de distintas herramientas, como el realizado por

CAPE-OPEN (CAPE, 1999). Todo ello hace cada vez más sencillo, rápido y barato el desarrollo de simuladores dinámicos para sectores industriales muy diversos, independientemente de que no se trate de entornos muy peligrosos o no se espere del uso de la simulación un beneficio económico directo sustancial.

Desde mediados de los años 90, se han venido utilizando con éxito las tecnologías descritas para el desarrollo de librerías de modelos reutilizables en la industria de proceso (Urquía 2000). Las principales aportaciones que ofrece este trabajo en este contexto son, en primer lugar el hecho de trabajar en el sector azucarero, con muy pocos trabajos previos que traten del modelado del proceso. El número herramientas de simulación para el sector azucarero es muy limitado. Solamente se han localizado dos programas de simulación orientados a la industria azucarera: SUGARS® (Sugars, 2009) y SIMFAD (ICIDCA 2009). El gran inconveniente de ambos es el hecho de que los modelos que se utilizan son estacionarios, por lo que su uso es inapropiado en algunos campos como pueden ser el diseño de controladores o el entrenamiento de operadores de sala de control. Otro de los aportes es que las librerías desarrolladas incluyen la posibilidad de incluir malfunciones y fallos en la operación del proceso. Esta característica, multiplica la dificultad de desarrollo ya que los modelos, además de reflejar comportamientos distintos según el modo de operación, han de ser capaces de comportarse de manera estable y robusta en situaciones matemáticamente muy desfavorables.

El proceso azucarero resulta bastante complejo, en él se dan prácticamente todos los tipos de operaciones básicas que

aparecen en la ingeniería de procesos, con multitud de equipos diferentes, mezcla procesos continuos y procesos batch y dinámicas muy diferentes. Esto configura un proceso muy completo y variado, que exige el desarrollo de numerosos modelos matemáticos y que resulta difícil de simular con tiempos computacionales aceptables (Van der Poel et al, 1998), (Mc Ginnis, 1982).

A la hora de enfrentarse con la tarea de desarrollar modelos matemáticos para una industria azucarera aparecen varias posibilidades, tanto desde el punto de vista del tipo de modelos matemáticos que pueden utilizarse, como de las herramientas informáticas necesarias para la implementación de los mismos. Se describirán inicialmente las razones que hacen que el Paradigma de Modelado Orientado a Objetos resulte el más adecuado para el desarrollo de los modelos. Para la organización de los modelos se ha utilizado la estructura de librerías que posee la herramienta de modelado, de forma que se clasifican los modelos en dos grandes grupos: modelos de tipo general, que incluyen aquellos que pueden aparecer en cualquier zona del proceso y modelos de secciones específicas que serán los que puedan aparecer únicamente una sección del proceso. A su vez estos dos grandes grupos se dividen en varios subgrupos. En la sección 3, se describen algunas de estas librerías, especialmente su filosofía de construcción y los principales problemas que ha sido necesario solventar durante su desarrollo.

Finalmente se muestra de forma somera cómo es posible, a partir de los modelos contruidos y de una serie de herramientas adicionales, realizar una simulación distribuida del proceso azucarero completo. Se muestran también ciertas aplicaciones de los modelos desarrollados, algunas de las cuales han sido ya probadas de manera satisfactoria.

2. HERRAMIENTA DE DESARROLLO

Todo proyecto de simulación debe iniciarse con la especificación de unos objetivos que determinarán los requerimientos de las herramientas de desarrollo, en base a los cuales se seleccionará la herramienta adecuada. En el caso que se presenta, se pretende disponer de un entorno de desarrollo de simulaciones dinámicas del proceso de producción del azúcar, de modo que las simulaciones construidas puedan servir como fuente de datos para un simulador de entrenamiento de operarios, como banco de pruebas para aplicaciones de control y optimización o como parte del algoritmo de cálculo de una aplicación de control y optimización.

Los principales requerimientos considerados a la hora de elegir una herramienta de modelado han sido los siguientes:

- a) La velocidad de ejecución debe ser tal que al menos permita simular el funcionamiento del sistema en tiempo real (Laganier, 1996).
- b) Las simulaciones deben poder parametrizarse fácilmente.
- c) Hay que tener en cuenta aspectos relacionados con los resolutores de las ecuaciones que forman parte del modelo del sistema a simular (Cellier & Kofman, 2006) y la facilidad para disponer de modelos simbólicos parametrizables.
- d) Para garantizar criterios de precisión y parametrización, debe recurrirse a modelos dinámicos basados en primeros principios. Dada la variedad de equipos de proceso

existentes en la industria azucarera y la existencia de procesos continuos y por lotes, es necesario utilizar una herramienta que soporte la utilización de DAEs, EDOs, EDPs y que permita el tratamiento de discontinuidades y eventos (Himmelblau, 1976).

e) La característica de reconfigurabilidad que debe soportar el entorno de desarrollo de las simulaciones implica que los modelos que se formulen sean no-causales.

f) Otra característica a tener en cuenta, es el uso del entorno de desarrollo de simulaciones por parte de usuarios finales que no sean los propios desarrolladores de los modelos. (Acebes & de Prada, 1999).

En base a estos criterios, la opción que aparece como más adecuada es la de utilizar un entorno de modelado gráfico y simulación basado en un lenguaje de modelado orientado a objetos basado en ecuaciones (equation-based OOML) (Elmqvist, 1978), frente a otras alternativas, quizás más establecidas (Aström et al., 1998), como son los entornos orientados a bloques, bien sean basados en bloques elementales (SIMULINK, VISIM) o sentencias (ACSL) (Rimwall & Cellier, 1986) o los bond-graph (Paynter, 1961). Existen en el mercado varios entornos de este tipo como son Dymola (Dynamics, 2008) o MathModelica (Mathcore, 2008), que soportan modelos descritos de acuerdo a la especificación Modelica (Modelica, 2005), u otros como EcosimPro (EcosimPro, 2009) que tienen su propio lenguaje de modelado (EcosimPro Language), que siendo más sencillo que Modelica (Fritzon, 2004) contiene todas las directivas que se necesitan para plantear un modelo híbrido.

Finalmente hay que tener en cuenta no sólo la facilidad para construir un modelo y su eficiente resolución, sino que también es importante el entorno en el que se va a usar dicho modelo:

- a) En el caso que se presenta, las simulaciones deben ejecutarse en sistemas operativos Windows, que no dependan de licencia de ejecución para su uso y permitan su intercambio de datos con otras aplicaciones.
- b) Por otro lado, existe la necesidad de utilizar el modelo conjuntamente con otras herramientas. En el caso del simulador de entrenamiento, debe suministrar y recibir datos de un SCADA usando el estándar *de facto* de comunicaciones industriales denominado OPC (OPC, 2008). En otros casos se hace necesario incluir el modelo en una dll que pueda ser llamada por otra aplicación. Con lo cual se requiere que el modelo de simulación generado sea lo más abierto y fácil de incrustar. En la actualidad, si el modelo de simulación se genera en forma de clase C++, se garantiza dicha facilidad de integración junto a otras aplicaciones. Este es el caso de EcosimPro.

Así, se ha elegido EcosimPro como herramienta de desarrollo considerando que tiene:

- a) Un completo lenguaje para la descripción de modelo híbridos sustentado en el paradigma de los lenguajes de modelado orientados a objetos basados en ecuaciones.
- b) Un entorno adecuado para la definición de librerías y modelos (gráfica y textualmente).
- c) Los algoritmos apropiados para la manipulación simbólica de los modelos.
- d) Un buen revolvedor de DAEs (DASSL).
- e) Facilidades para el uso de los modelos de simulación tanto fuera como dentro del entorno de desarrollo.

3. LIBRERÍAS DE PROCESOS AZUCAREROS

La forma de estructurar los componentes en EcosimPro es a través de las llamadas librerías. Dentro de las mismas se agrupan los distintos componentes, funciones, etc. relacionados generalmente con un campo de aplicación específico. Se han creado por tanto una serie de librerías en las que se agrupan los componentes desarrollados.

3.1 Descripción del proceso azucarero

La remolacha se analiza al llegar a fábrica y se lava para eliminar el material silíceo que la acompaña. A continuación se corta en tiras delgadas llamadas cosetas, mediante unos molinos de platos horizontales. Estas cosetas se llevan a la etapa de difusión, en la que utilizando agua caliente se extrae la sacarosa de las mismas. En la etapa de difusión se obtiene un jugo verde y un residuo agotado, conocido como pulpa.

La pulpa contiene entre un 92% y un 98% de agua y debe secarse bien y pronto, para evitar su destrucción por los microorganismos. La pulpa se prensa antes del secado con lo que se consigue un considerable ahorro de energía y la recuperación de parte el azúcar que aún contiene. La pulpa prensada se lleva a los secaderos para eliminar el agua restante que no puede ser eliminada por métodos mecánicos. Para realizar el secado se utilizan los gases de combustión producidos en un hogar. La pulpa seca obtenida, que contiene un 90 % de materia seca, se utiliza para la alimentación del ganado.

Por otro lado, el jugo verde obtenido debe purificarse al máximo posible para eliminar las sustancias que no son sacarosa. Para ello se introduce en la sección de depuración, en la que mediante un tratamiento químico, se consiguen precipitar los no azúcares que son separados del jugo mediante filtración. El jugo depurado obtenido se concentra en la sección de evaporación mediante el aporte de calor, por medio de vapor, evaporando parte del agua que contiene. El jugo concentrado que se obtiene se lleva finalmente al cuarto de azúcar. En el cuarto de azúcar tiene lugar la cristalización del azúcar. La cristalización se produce mediante la evaporación de parte del agua que aún contiene el jarabe, llevando el mismo a condiciones de sobresaturación, con lo que se produce la cristalización de la sacarosa. Este proceso se repite en dos o tres ocasiones hasta que no puede extraerse más azúcar de la melaza final. A continuación es necesario separar los cristales de las aguas madres, lo cual se realiza mediante centrifugación. Finalmente el azúcar es secado y almacenado, para su empaquetado distribución y venta.

3.2 Estructura de las librerías: puertos, propiedades, unidades básicas, unidades específicas

Para la simulación del proceso azucarero se han creado una serie de librerías en las que se agrupan los componentes desarrollados. Algunas de estas librerías son específicas para las diferentes partes del proceso, pero existen otras que reúnen componentes que son comunes a las diferentes secciones de la planta. Estas librerías se denominan genéricas y son las siguientes:

- Propiedades fisicoquímicas de productos azucareros.
- Puertos de conexión de los componentes.
- Elementos de proceso que se han denominado básicos: equipos de almacenamiento, intercambio térmico y transporte.
- Elementos de control: Controladores, medidores, etc.

A continuación se describen algunas de estas librerías.

La librería de propiedades físicas.

En la industria azucarera existen una serie de productos y materias primas cuyas propiedades deben ser incluidas en el lenguaje de modelado, de forma que puedan ser instanciadas desde cualquier componente. Se creará para ello una librería en la que se agruparán las propiedades fisicoquímicas de los principales compuestos utilizados en la industria azucarera (Bubnik et al, 1995).

Las propiedades fisicoquímicas están definidas principalmente por un conjunto de funciones que encapsulan las propiedades que van a ser necesarias en los modelos. Estas funciones están formadas fundamentalmente por ecuaciones algebraicas y tablas, que realizan los cálculos necesarios para la estimación de la propiedad.

El primer paso, antes de definir las propiedades fisicoquímicas, es determinar los compuestos químicos que van a aparecer en los modelos. Esto es necesario debido a que estos compuestos se utilizarán como parámetros de construcción en la mayoría de las propiedades. Una de las particularidades de EcosimPro, que lo hace útil para el modelo de sistemas de la industria de procesos, es la capacidad de definir productos, de modo que cada uno de ellos esté formado por un subconjunto de compuestos químicos de entre todos los que pueden aparecer en un producto. De este modo se puede particularizar el modelo de cada unidad elemental en función de los productos que reciban en cada uno de sus puertos. Se hace a través de dos tipos de datos llamados ENUM y SET_OF (enumerados y subconjuntos).

Los enumerados son un tipo de datos definidos por el usuario. Los posibles valores de este tipo de datos se enumeran en la definición y una vez que el dato enumerado ha sido definido se pueden declarar variables de ese tipo.

Los subconjuntos son otro tipo especial de datos muy útiles para el modelado de sistemas químicos basados en los enumerados. Pudiéndose definir subconjuntos de los enumerados previamente definidos. En el caso de la librería desarrollada, se ha definido un enumerado llamado Chemical, que incluye todos los componentes que se utilizarán en los modelos.

Tanto los enumerados como los subconjuntos pueden ser utilizados como parámetros de construcción de componentes y puertos, COMPONENT Reactor (SET_OF(chemicals) mix)), y para dimensionar arrays (REAL r[mix]). Cuando se utilizan los SET_OF como parámetros de construcción de componentes o puertos, el enumerado puede ser de tipo general, mix en el ejemplo anterior, y ser asignado a un enumerado concreto en la instanciación del componente o puerto.

Además de lo descrito, se definen también una serie de constantes específicas de los distintos compuestos, como constantes para el cálculo del calor específico, masas moleculares, etc.

Una vez definidos los compuestos químicos y las constantes, el siguiente paso es la implementación de las propiedades fisicoquímicas necesarias de cada una de las especies químicas definidas en el enumerado. Estas propiedades están definidas tanto para la fase líquida como para la fase vapor de los compuestos químicos. Se encuentran en forma de ecuaciones o

de tablas y se calculan a partir de los argumentos correspondientes en cada caso (presión, temperatura, concentración, etc).

Con el objetivo de obtener la máxima generalidad en los componentes, se han desarrollado funciones generales en las que, con una única llamada, se puedan calcular propiedades físico-químicas medias de distintos enumerados definidos previamente.

De esta forma las propiedades no son desarrolladas para productos concretos sino para cualquier compuesto, ya que en la llamada a las propiedades se especifica el nombre del enumerado y la función general de cálculo llama a su vez a la propiedad concreta de ese enumerado. Esto proporciona una gran generalidad a los componentes en los que se utilizan productos químicos, permitiendo su reutilización directa en diferentes contextos, con independencia de los compuestos que aparezcan en el mismo.

La librería de puertos: ejemplo

Los puertos conectan componentes, tanto desde el punto de vista de los valores que cada componente necesita comunicar con su entorno, como de sus restricciones y ecuaciones aplicables a las conexiones. Los puertos son por tanto uno de los elementos que definen la interfaz del componente. Estos puertos van a permitir tanto conexiones simples como múltiples. Las variables que aparecen en los puertos serán las únicas, junto con los datos y las condiciones de contorno, que serán visibles desde el exterior de los componentes (EcosimPro, 2009)

Dentro de los componentes existe un bloque, denominado PORTS, en el que se definen los puertos que posee ese componente. Por ejemplo, en la Figura 1, existe un puerto de entrada de tipo “fluido” denominado “Entrada” y un puerto de salida de tipo fluido denominado “Salida”.

```
COMPONENT Tubo
PORTS
  IN fluido Entrada
  OUT fluido Salida
DECLS
  .....
```

Figura 1. Instanciación a los puertos desde un componente.

Una instancia del componente “Tubo” definido en la figura 1, podrá conectarse a través de su puerto fluido, con otros componentes que posean un puerto de este tipo, conectando directamente la salida de la instancia de este componente con la entrada de otra, con una sentencia del tipo:

```
CONNECT tubo1.Entrada TO tubo2.Salida
```

También podrá hacerse de forma directa a través de la herramienta gráfica que posee EcosimPro. Para ello basta con unir, arrastrando el ratón, dos puertos del mismo tipo.

Cada puerto de un componte debe tener asociado un modo IN o OUT. Los modos sirven para varias cosas:

- Criterio de referencia para el signo de las variables de flujo. Si una variable de flujo de un puerto IN es positiva, implica que el flujo es entrante, de la misma manera un valor positivo en un puerto OUT implica que el flujo es saliente.

- Criterio para aplicar ecuaciones de conexión.
- Comprobación de posibles violaciones de las restricciones de conexión explicadas en la definición del puerto.

En la figura 2 se muestra un ejemplo de uno de los puertos que ha sido desarrollado para la industria azucarera, el puerto de líquido. A este puerto le llega como argumento la composición del fluido. A partir del número y el tipo de componentes se calculan las propiedades y las variables necesarias en el puerto.

```
PORT liquido (SET_OF(Chemical)Mix)

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 (%l en
peso)"
REAL x[Mix] RANGE 0.,1. "Fracc molar"
EQUAL REAL P RANGE 0,Inf "Presión (bar)"
REAL T RANGE -273.,Inf "Temperatura (°C)"
EQUAL OUT REAL H
"Entalpía específica (KJ/Kg)"
SUM IN REAL f_energ "Flujo de
entalpía (KJ/s)"
REAL Rho RANGE 0,Inf "Densidad (Kg/m^3)"
REAL F RANGE 0,Inf "Flujo volumétrico"

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])
H = entalp_liquido(Mix,T,C)
INVERSE(T) T = T_liquido(Mix,H,C)
f_energ = W * H
Rho = den_liquido(Mix,T,C)
W=F*Rho
INVERSE (F) F=zona(W,Rho,0.)

-- relación entre concentración en peso (C) y en fracción molar
(x)
EXPAND (j IN Mix)
x[j] = (C[j]/Mmolec[j])/SUM(i IN Mix; (C[i]/Mmolec[i]))
END PORT
```

Figura 2. Código EL de un puerto de líquido.

Las variables que aparecen en el puerto son las siguientes:

Flujo másico (W): Esta variable representa el caudal de fluido expresado en unidades de flujo másico (MT^{-1}). Estas variables están modificadas mediante el modo SUM, lo que significa que en las conexiones, los flujos de masa siempre se van a sumar. Esta es una manera de escribir la ley de conservación de la masa.

Concentraciones (C[Mix]): Representa las concentraciones de las especies que componen el fluido. Los modificadores de esta variable son de tipo EQUAL OUT. El modificador OUT nos indica que el modo EQUAL sólo tiene efecto cuando las concentraciones encuentran un puerto de salida, es decir, en el caso de una bifurcación las dos ramas de salida tendrán los mismos valores de concentración que la rama de la que proceden, pero no así en las ramas de entrada.

Flujo másico de cada componente (Wi[Mix]): Aunque esta variable pueda en principio parecer redundante, es necesaria para poder relacionar las concentraciones con los flujos másicos totales. Si no existiera esta relación, el programa dispondría de información para calcular las concentraciones en el caso de una bifurcación de ramas, pero no sería capaz de calcularlas en el caso de una unión de corrientes. Esta variable es SUM al igual

que los flujos másicos, se utilizará sin embargo el modo restringido SUM IN dado que de otra manera se crearían ecuaciones redundantes en el caso de una bifurcación.

Entalpía específica (H): Representa la entalpía específica (por unidad de masa) asociada al flujo de fluido. Esta variable tiene como modificadores los modos EQUAL OUT, ya que en una bifurcación las entalpías específicas, por las ramas de salida, son iguales entre sí e iguales a las entalpías específicas de la rama de la que proceden. Para el cálculo de la entalpía se utiliza la ecuación:

```
H = entalp_liquido (Mix, T, C)
INVERSE (T) T = T_liquido (Mix, H, C)
```

Figura 3. Llamada a la entalpía de un compuesto desde un puerto.

Esta función recibe como argumentos la temperatura, las concentraciones y el nombre de un componente o grupo de componentes. Con estos valores llama a una función general en la que se compara el nombre del componente o del grupo de componentes con los nombres de los que la función dispone (Figura 3). Si entre los componentes de la función está el demandado, la función llama a otra función de entalpía, esta vez específica del componente o mezcla de componentes, a la que se pasan como parámetros la temperatura y las concentraciones y que devuelve el valor deseado de la entalpía. En esta función se utiliza también la sentencia INVERSE para el caso en el que la variable que se desee calcular sea la temperatura.

De la misma manera aparecen en el puerto otras variables como el flujo de energía, el flujo volumétrico, la densidad..., cada una con los modificadores necesarios, de forma que se garantice la generación automática de las ecuaciones necesarias para relacionar las variables que se intercambian en los puertos.

Ecuaciones adicionales en la zona continua

Junto con estas ecuaciones descritas anteriormente para el nodo, existen otras en la zona continua, que proporcionan información adicional acerca de las relaciones entre las variables del puerto. Estas ecuaciones son válidas para cada rama que llega al nodo.

Suma de concentraciones: la suma de las concentraciones de todos los componentes (C_j) de la mezcla es igual a la unidad.

$$1 = \sum_{j=1}^{Mix} C_j \quad (1)$$

Flujos másicos: la suma de los flujos másicos de cada componente (W_j) es igual al flujo másico total (W).

$$W = \sum_{j=1}^{Mix} W_j \quad (2)$$

Por otro lado, el producto del flujo másico total por la concentración, es igual al flujo másico de cada componente. Si se introdujese esta expresión para todos componentes de la mezcla se estaría introduciendo una ecuación redundante, ya que una de ellas podría obtenerse mediante combinación lineal de las demás junto con la ecuación (3) Por tanto se aplicará esta ecuación a todos los componentes de la mezcla menos uno.

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 \cdot W = W_1 \\ \vdots \\ C_{Mix-1} \cdot W = W_{Mix-1} \end{array} \right. \quad (3)$$

El resto de las relaciones que aparecen en la zona continua han sido descritas ya en la descripción de las variables del puerto.

Librería de elementos de proceso básicos: Transporte, almacenamiento y calentamiento de productos. Ejemplo

La librería de elementos de proceso básicos está constituida por los equipos de los que consta habitualmente una línea de flujo general, como son los elementos que transportan fluidos, tuberías, válvulas, bombas..., los equipos para el calentamiento de fluidos y los elementos de almacenamiento.

Se han desarrollado modelos matemáticos para cada uno de estos equipos. Dado que estos equipos son muy numerosos, los modelos deben ser sencillos, de tal forma que modelen de forma cuantitativa el comportamiento real, pero ignorando aspectos que complicarían los modelos hasta hacerlos inmanejables, distribución del cálculo en tuberías, acumulación de condensados en cambiadores, etc.

A la hora de construir las librerías de los elementos de transporte, almacenamiento y calentamiento de fluidos, se reparó en la necesidad de fijar una estrategia para el desarrollo de estos elementos, que aparecen en la mayoría de las líneas de flujo de la planta. Esta estrategia debía ser tal, que alguien totalmente ajeno al desarrollo de los modelos, fuera capaz de interconectar los elementos que aparecen en la librería, previendo y evitando los problemas asociados a la manipulación de ecuaciones que aparecen en este tipo de conexiones. Esto no resulta fácil, sobre todo cuando se pretende realizar redes de tuberías complejas, ya que aparecen lazos algebraicos y problemas de índice que dificultan o imposibilitan la resolución del problema.

En la mayoría de componentes que aparecen en una línea de flujo, el caudal y la presión vienen relacionados por una ecuación del tipo:

$$W = f(\Delta P) = f(P_2 - P_1) \quad (4)$$

Siendo W el caudal, ΔP la variación de presión y f una función en general no lineal.

Los problemas pueden aparecer a la hora de despejar las incógnitas de esta ecuación. Así, en el caso sencillo de un solo elemento de flujo en una línea, si se conoce por ejemplo la presión de entrada y el caudal, y se necesita calcular la presión de salida y esta variable no puede ser despejada de la ecuación (4). El programa de cálculo dejará la ecuación como implícita e iterará sobre ese valor hasta cerrar la ecuación. Se tendrá un lazo algebraico.

Como se explicó con anterioridad, los lazos algebraicos pueden ser resueltos por EcosimPro, pero en el caso de estudio no es interesante que aparezcan, ya que la iteración que se genera para la búsqueda de soluciones hace que la simulación se vuelva algo

más lenta y puede en ocasiones generar problemas de convergencia.

Al igual que se hizo para el caso de las propiedades fisicoquímicas, se utilizará la sentencia INVERSE, de forma que se evaluarán distintas funciones según sea el caudal o alguna de las presiones la variable desconocida, evitando la aparición de lazos algebraicos.

Conexiones entre elementos de flujo

Además de los problemas que pueden aparecer durante la simulación de los elementos de flujo de forma aislada, existen complicaciones adicionales cuando se unen varios elementos de transporte. Estos problemas surgen también de forma natural cuando se pretenden calcular de forma “manual” algunas conexiones entre este tipo de elementos.

Un ejemplo de este tipo de problemas se presenta, en el caso de la conexión de tuberías en paralelo (Figura 4), en el que se conoce el caudal total que circula por los dos elementos de flujo (W_T) y la presión a la entrada de la línea (P_2).

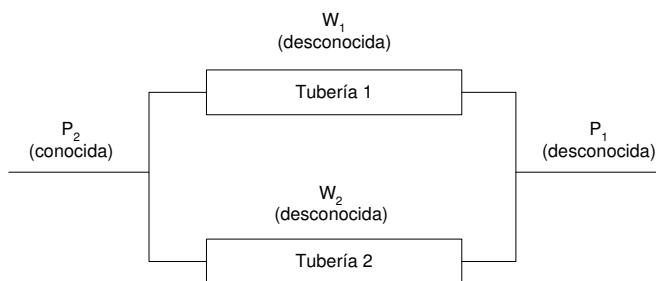


Figura 4. Conexión de elementos de flujo en paralelo.

Para resolver este problema es necesario iterar sobre los caudales hasta cerrar las ecuaciones de la caída de presión en las dos líneas. El sistema de ecuaciones que resulta en este ejemplo es el siguiente:

$$W_1 = f_1(P_2 - P_1) \quad (5)$$

$$W_2 = f_2(P_2 - P_1) \quad (6)$$

$$W_T = W_1 + W_2 \quad (7)$$

En la primera ecuación aparecen como incógnitas la presión de salida (P_1) y el caudal que circula por la primera línea (W_1). En la segunda ecuación aparecen como incógnitas la presión de salida (P_1) y el caudal que circula por la segunda línea (W_2) que está relacionado con el de la primera línea mediante la tercera ecuación.

En este caso no es posible manipular las ecuaciones de forma que a cada incógnita le corresponda una sola ecuación, en la matriz de incidencia del sistema aparece un uno en la parte superior derecha, se tendrá así un lazo algebraico.

	W_1	W_2	P_1
$W_1 = f_1(P_2 - P_1)$	1	0	1
$W_2 = f_2(P_2 - P_1)$	0	1	1
$W_T = W_1 + W_2$	1	1	0

(8)

Para evitar la aparición de este lazo, se transforma una de las variables desconocidas en variable de estado, de forma que pasa a ser calculada por integración numérica. Si se opera de esta

forma con W_1 (Ecuación 11), la nueva variable desconocida será ahora la derivada de W_1 .

$$\alpha \cdot \frac{dW_1}{dt} = f_1(P_2 - P_1) - W_1 \quad (9)$$

Siendo α una constante de tiempo que debe ser lo suficientemente pequeña como para que la dinámica de esta ecuación sea rápida y su resultado no difiera en el tiempo del que se obtiene con la ecuación algebraica, pero no tan pequeña como para forzar un paso de integración muy pequeño que ralentice la simulación.

Permutando filas y columnas es posible obtener una matriz de incidencia triangular inferior, es decir, se ha deshecho el lazo algebraico: Es pues necesario que cada componente de una línea de flujo tenga modelos alternativos que puedan ser seleccionados por el usuario de la librería.

	W_2	P_1	W_1'
$W_T = W_1 + W_2$	1	0	0
$W_2 = f_2(P_2 - P_1)$	1	1	0
$W_1' = f_1(P_2 - P_1)$	0	1	1

(10)

Como ejemplo de componente que aplica todas estas características en la figura 5 se muestra el código de una tubería.

Puede observarse como la tubería utiliza un parámetro de tipo BOOLEAN (*impl*) que decide el uso de una sentencia u otra utilizando la sentencia EXPAND. De esta forma puede decidirse en tiempo de instanciación si se utiliza la ecuación algebraica o la ecuación diferencial para resolver el problema y evitar los problemas descritos con anterioridad. Además en el caso de la ecuación algebraica tiene definida su inversa. Obsérvese además que se ha hecho uso del mecanismo de la herencia para heredar la interfaz de conexión y la declaración de variables del componente abstracto llamado *Bernoulli*.

```

COMPONENT Tubo_liq IS_A Bernoulli (BOOLEAN impl)
DATA
  REAL D "diámetro interior del tubo(m)"
  REAL L "longitud de la tubería(m)"
  REAL e = 0.046e-3 "rugosidad de la tubería. valor por defecto:acero (m)"
DECLS
  REAL S "sección transversal tubería (m2)"
  REAL f "coeficiente de fricción"
CONTINUOUS
  S = PI/4 * D**2
<eqn1> IMPL (f) = 1./(-2.5 * log(max(((e/D)**0.27), 1.e-8)))**2
EXPAND(impl==TRUE) f_in.W = (S*sqrt(hf*(2*g)/(8*f*(L/D)))+0) * f_in.Rho
                        INVERSE (hf) hf = 8.*f*(L/D)*(((f_in.W/f_in.Rho)/S)**2)/2./g
EXPAND(impl==FALSE) 0.01 * f_in.W = (S*sqrt(hf*(2*g)/(8*f*(L/D)))+0) * f_in.Rho - f_in.W
                        f_in.T = f_out.T
END COMPONENT

```

Figura 5. Código EcosimPro de una tubería de líquido.

La incorporación de una ecuación diferencial al modelo, evita en algunos casos la aparición de lazos algebraicos, pero puede originar otro tipo de inconvenientes como problemas de índice superior en la conexión de componentes. Estos aparecen cuando, por ejemplo, se conectan dos elementos de flujo en serie (el caudal que circula por las dos es el mismo) (Figura 6).

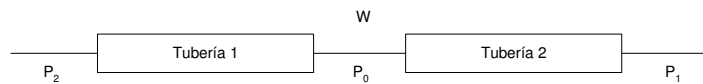


Figura 6. Conexión de elementos de flujo en serie.

Si se utiliza una ecuación diferencial para el cálculo de los caudales en las dos tuberías, se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\alpha \cdot \frac{dW_1}{dt} = f_1(P_2 - P_0) - W_1 \quad (11)$$

$$\alpha \cdot \frac{dW_2}{dt} = f_1(P_0 - P_1) - W_2 \quad (12)$$

$$W_2 = W_1 \quad (13)$$

Existe una ligadura entre variables de estado que genera un problema de índice. Ya que usaría la ecuación (11) para calcular W_1 , la ecuación (12) para calcular W_2 y no podría calcular P_0 y le sobraría la ecuación (13). Los problemas de índice son indeseables en los modelos, ya que, aunque la herramienta utilizada dispone de un algoritmo para reducir el índice del problema, no siempre es capaz de hacerlo, y en muchos casos se reduce el índice del sistema hasta uno con lo que se obtiene finalmente un lazo algebraico. Esto dificulta el manejo de las librerías a los usuarios no familiarizados con este tipo de problemas.

Mediante la utilización del parámetro *impl*, se da la posibilidad al usuario final de modificar de alguna manera la estructura matemática del modelo, de forma que algunos de los problemas matemáticos que pueden surgir en el momento de la agregación de los componentes, se resuelvan de forma más sencilla. En (Merino 2008) puede encontrarse una guía completa, en la que se indica, en función del tipo de conexión que se utiliza y las condiciones de contorno existentes en la línea de flujo, los valores más apropiados para este parámetro de forma que la solución al problema matemático sea la más sencilla posible.

Otro enfoque para abordar el problema que aparece en la conexión de componentes en líneas de flujo y en general entre distintos equipos, es afrontado por otros autores que, mediante la incorporación de conocimiento físico en el entorno de modelado, resuelven total o parcialmente estos problemas (Piera, 1993), (Acebes, 1996), (Ramos, 2003).

Las librerías de unidades de proceso específicas: Ejemplo difusión

Además de las librerías de carácter general descritas hasta ahora, existen otras que contienen únicamente componentes específicos de determinadas secciones productivas y que por tanto se clasifican de forma independiente. Como ejemplo de una de ellas se tomará la librería denominada ELEMENTOS_DE_LA_DIFUSION, que incluye los equipos de proceso que solamente aparecen en la sección de difusión, como son los difusores, los intercambiadores jugo coseta o las prensas de pulpa. Si se desea conocer en detalle el resto de elementos modelados del proceso de producción del azúcar puede recurrirse a (Merino, 2008).

En la Figura 7. se muestran los iconos de los distintos elementos que han sido desarrollados para esta sección, que son principalmente:

- Difusor DDS.

- Difusor RT.
- Intercambiadores jugo coseta.
- Prensas de pulpa.
- Cintas transportadoras.

Dado que existen diversas versiones de los componentes en función de su grado de complejidad o de si incluyen o no malfunciones, pueden aparecer iconos similares para un mismo componente.

De entre todos los equipos modelados destaca tanto por su importancia en la operación del proceso como por la complejidad de su modelo matemático, el difusor. Se han desarrollado dos modelos diferentes de difusores; el RT (Merino & Acebes, 2003) y el tipo DDS que describiremos a continuación.

Figura 7. Iconos de la librería de elementos de proceso específicos de la sección de difusión.

Descripción básica de un difusor DDS: características del modelo matemático, interfaz del componente (gráfica, puertos y parámetros).

Este difusor fue inventado desarrollado por la DDS (De Danske Sukkerfabrikker) (Figura 8). Este tipo de difusores consiste fundamentalmente en una vasija en forma de U, con dos tornillos con diferentes sentidos de giro que se superponen. Estos difusores están ligeramente inclinados, de forma que el jugo avanza por gravedad a través del mismo. Las cosetas que entran, caen sobre la parte inferior desde una cinta transportadora, y son entonces transportadas en sentido ascendente por los dos tornillos superpuestos hasta una pala que saca las cosetas del difusor. El jugo verde abandona el difusor por una rejilla colocada en la parte inferior. La parte inferior del difusor opera de manera similar a los intercambiadores jugo-coseta, en esta zona el jugo verde se enfría y las cosetas se calientan. La diferencia de temperaturas entre la coseta y el jugo debe ser aproximadamente de 15 °C. Para que la difusión tenga lugar a la temperatura deseada (unos 73 °C) es necesario aportar calor a la mezcla jugo-cosetas que atraviesa el difusor. Este calor lo aportan una serie de camisas calefactoras con control de temperatura que utilizan vapor como medio de calefacción.

Figura 8. Sección longitudinal y transversal de un difusor DDS. (Tomado de Van der Poel et al, 1998).

1. Cinta transportadora y pesado de las cosetas; 2. Tornillos; 3. Entrada del agua de prensas; 4. Entrada del agua de aportación; 5. Pulpa agotada; 6. Camisas calefactoras; 7. Rejilla para el paso del jugo; 8. Bomba de jugo verde; 9. Nivel de las cosetas; 10. Nivel del jugo.

Características del modelo y suposiciones de modelado

Este tipo de difusores se caracterizan por poseer una relación longitud-diámetro elevada, por lo que las variables poseen una dependencia muy importante en la dirección axial, siendo menos importante la variación en la dirección radial. Esta característica hace que la utilización de modelos de parámetros concentrados sea insuficiente para representar de forma adecuada su comportamiento. Se hace necesario el desarrollo de un modelo de parámetros distribuidos. Por otro lado, los fenómenos que ocurren 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. Esto configura un sistema difícil de modelar.

Los problemas de parámetro distribuido se pueden resolver de manera analítica o por algún método numérico. Las EDPs (Ecuaciones en Derivadas Parciales) que pueden resolverse utilizando métodos analíticos son muy pocas. La mayoría de los problemas han de ser resueltos mediante métodos numéricos.

A la hora de resolver numéricamente una ecuación en derivadas parciales utilizando un lenguaje de simulación orientado a ODEs y DAEs existen dos alternativas. La primera es la utilización de un método de resolución que resuelva directamente el problema de derivadas parciales. Para ello pueden utilizarse distintas técnicas como pueden ser los métodos de los residuos promediados o los de elementos finitos (Finlayson, 1980). La segunda alternativa consiste en discretizar, si es posible, una de las variables dependientes manteniendo la otra derivada y transformándola en una diferencial total, de forma que se obtenga un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias. Esta última técnica es lo que se denomina *método de las líneas* (Schiesser, 1991).

El método de las líneas es esencialmente un método en dos pasos:

- Las derivadas espaciales son aproximadas de forma algebraica, utilizando un método numérico como diferencias finitas.
- El sistema resultante de ODEs, cuya variable independiente suele ser el tiempo, es integrado utilizando un integrador de ODEs.

EcosimPro, el lenguaje que se utilizará para el desarrollo de la librería de modelos, no dispone por el momento de ningún resolutor de ecuaciones en derivadas parciales, pero sí dispone de un integrador de DAEs, por ello, resulta ventajoso modificar la formulación matemática del modelo de forma que se elimine la dependencia de las dimensiones espaciales de las ecuaciones. De esta forma, utilizando el método de las líneas, el sistema queda expresado en forma de ecuaciones diferenciales ordinarias. El conjunto de EDOs generado se integrará entonces con respecto al tiempo utilizando el método numérico que nos parezca más apropiado, dentro de los métodos de los que disponga la herramienta. Se obtienen de esta forma las evoluciones temporales de las variables en cada uno de los puntos de discretización, con lo que se aproxima el sistema en parciales.

La utilización del método de las líneas presenta varias ventajas:

- Las integraciones temporal y espacial están separadas, esto proporciona una gran flexibilidad a la hora de usar rutinas ya existentes.
- Este método se puede utilizar con cualquiera de los tipos más importantes de ecuaciones en derivadas parciales (elípticos, hiperbólicos y parabólicos).
- Los sistemas de ODEs, DAEs y EDPs (en una, dos o tres dimensiones más el tiempo) pueden ser fácilmente acoplados.
- La aplicación de este método para el sistema que se va a tratar, transforma el sistema de parámetros distribuidos en una serie de sistemas de parámetro globalizado (Himmelblau, 1976).

Para ilustrar la aplicación del método de las líneas al caso del difusor, se muestra aquí el caso concreto de un balance de materia de tipo general. Se parte del modelo de balance de materia en parciales:

$$\frac{\partial(m(z,t) \cdot c_i(z,t))}{\partial t} + \frac{\partial(v_z(z,t) \cdot m(z,t) \cdot c_i(z,t))}{\partial z} = R_i(z,t) + T_i(z,t) \quad (14)$$

Donde m es la masa total, c_i es la concentración del componente i , t es el tiempo, v_z es la velocidad de avance de la sustancia en la dirección radial, z es la dimensión radial, R_i representa la generación de componente i en el sistema y T_i representa la velocidad de transferencia del componente i a través de los límites del sistema.

Tanto para el caso de los difusores DDS como RT se asume que $v_z(z,t)$ sólo depende de t , es decir la velocidad es constante a lo largo de todo el difusor. Para simplificar la notación se usará usaremos la variable C_i , igual al producto $m \cdot c_i$ que corresponde con la masa de componente i .

Si se divide el difusor en n elementos y se hace un desarrollo en serie de Taylor para la variable C_i alrededor del punto $j-1$ ($C_{i,j-1}$) se tiene:

$$C_{i,j-1}(t) = C_{i,j}(t) + \left(\frac{\partial C_i(t)}{\partial z} \right)_j (z_{j-1} - z_j) + \mathcal{O}(\Delta z)^2 \Rightarrow$$

$$\left(\frac{\partial C_i(t)}{\partial z} \right)_j = \frac{C_{i,j}(t) - C_{i,j-1}(t)}{\Delta z} + \mathcal{O}(\Delta z)^2 \quad (15)$$

Tomando la serie de Taylor de orden 1 y sustituyendo la expresión anterior en la ecuación del balance distribuido se obtiene:

$$\frac{\partial C_{i,j}(t)}{\partial t} = -v_z(t) \left(\frac{C_{i,j}(t) - C_{i,j-1}(t)}{\Delta z} \right) + T_{i,j}(t) + R_{i,j}(t) \quad (16)$$

Sabiendo que $C_{i,j}(t) = m_j(t) \cdot c_{i,j}(t)$, teniendo en cuenta que $\frac{v_z(t) \cdot m_j(t)}{\Delta z}$ es un flujo másico que se llamará $W_j(t)$ y operando, se obtiene un modelo de parámetro globalizado para cada etapa:

$$\frac{d(m_j(t) \cdot c_{i,j}(t))}{dt} = -W_j(t) \cdot c_{i,j}(t) + W_{j-1}(t) \cdot c_{i,j-1}(t) + T_{i,j}(t) + R_{i,j}(t) \quad (19)$$

El difusor es un elemento difícil de modelar ya que los fenómenos que tienen lugar en el interior son complejos. En primer lugar existen varios mecanismos simultáneos de transferencia de materia (difusión debida al gradiente de materia, osmosis inversa, aplastamiento mecánico, etc.). En segundo lugar la transferencia de materia y energía están relacionadas, ya que la temperatura afecta a la constante de transferencia de materia y a su vez la temperatura está afectada por la transferencia de materia.

Para simplificar el modelo se han hecho una serie de suposiciones y aproximaciones, que aquí no se detallan pero que pueden encontrarse en (Merino, 2008). A partir de estas suposiciones se construye el modelo de primeros principios del difusor que utilizando principalmente balances de materia, energía y cantidad de movimiento.

Implementación del modelo

El lenguaje EcosimPro permite una implementación muy compacta de las ecuaciones obtenidas mediante la aplicación del método de las líneas. Para ello dispone de una sentencia, EXPAND, que en una única línea posibilita la definición de un grupo de ecuaciones.

EXPAND(j IN 1,n)

mc[j]' = Wce[j] - Wcs[j] - mtrans[j]

Figura 9. Utilización de la sentencia EXPAND.

La sentencia EXPAND (Figura 9) permite insertar múltiples ecuaciones en función de un parámetro que se modifica. Esto tiene dos ventajas: Disminuye la cantidad de código y se puede parametrizar el tamaño del conjunto de ecuaciones que se crea. Esto último es especialmente útil en este caso ya que se puede hacer más grosera o más fina la discretización en función de un solo parámetro.

Construcción de secciones y del modelo de planta completa.

Una vez se han desarrollado los modelos de los elementos individuales correspondientes a las distintas secciones, se procede a la construcción de los modelos de las diferentes secciones en base a la agregación de los diferentes componentes que la constituyen.

La conexión de los elementos que constituyen esta sección es a su vez un componente dispondrá de puertos de entrada y salida que permitirán su conexión con otras partes de la factoría. En la Figura 10. se muestran los distintos puertos que existen en el componente final de la sección.

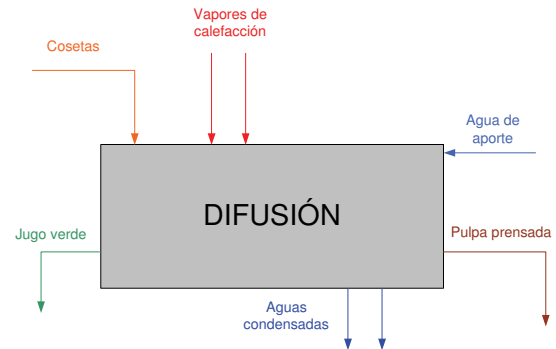


Figura 10. Puertos de conexión de la sección de difusión.

De la misma forma que para la sección de difusión, se construyen, mediante la agregación de componentes individuales, los componentes correspondientes a cada una de las secciones que constituyen el proceso azucarero, cada una con sus correspondientes puertos.

La simulación conjunta de toda una factoría requiere la ejecución conjunta de las secciones que la componen. La solución que aparece como inmediata para llevar a cabo esta tarea, consistiría en la unión de las diferentes secciones a través de los puertos que posee cada una de ellas, la creación de un componente, llamado cuarto de remolacha y la generación, a través de la correspondiente partición, del modelo matemático de la sección completa. Esta solución, que desde el punto de vista de la implementación resulta sencilla, desde el punto de vista de la velocidad de ejecución resulta inviable. En la Tabla 1 se muestran el número de ecuaciones y variables existentes en cada una de las secciones desarrolladas. Como puede apreciarse en la tabla 1, el número de ecuaciones que es necesario calcular en cada paso de integración es muy elevado, además se trata de un sistema muy *stiff* (combina dinámicas lentas y rápidas). De esta forma, para conseguir la ejecución conjunta del modelo en tiempo real es necesaria la utilización de varios equipos para la ejecución distribuida del modelo, dividido en distintas partes.

Tabla 1. Número de variables y ecuaciones de las secciones constituyentes del cuarto de remolacha.

	Ecuaciones	Variables	Cond. contorno
Difusión	7174	8279	1105
Secado de Pulpa	8882	9905	1023
Depuración (I)	3867	4930	1063
Depuración (II)	5202	6296	1090
Evaporación	2546	3649	2546
TOTAL	27671	33059	5388

Esta ejecución distribuida hace necesaria la implementación de una serie de herramientas que permitan la ejecución sincronizada y el intercambio de datos entre los distintos motores de simulación. Diferentes protocolos de comunicación y

alternativas de distribución, han sido analizados en profundidad en (Alves *et al.*, 2005).

En la arquitectura utilizada las simulaciones dotadas con una capa OPC, actúan como servidores de datos para los distintos elementos de la arquitectura. Se utiliza por otro lado un programa, Unesim, que se encarga de comunicar y sincronizar las simulaciones, es un cliente OPC que recibe la información de los distintos servidores y la envía a los distintos destinatarios.

Aplicaciones de los modelos desarrollados

La librería de modelos desarrollada así como el modelo conjunto de la factoría azucarera poseen multitud de aplicaciones. Se describen a continuación dos de las aplicaciones que se han utilizado en el Centro de Tecnología Azucarera (CTA).

Una de las aplicaciones más importantes del modelo conjunto de una factoría es su utilización como motor de cálculo de un simulador de entrenamiento (Merino *et al.*, 2006). En el Centro de Tecnología Azucarera se han integrado los modelos descritos en un simulador a través de una serie de herramientas desarrolladas a tal efecto. Se construye así una herramienta muy útil para la formación de operadores de sala de control. Este simulador hace uso además de la arquitectura distribuida, para la comunicación de simulaciones vía OPC ya mencionada con anterioridad, obteniéndose resultados satisfactorios.

En la Figura 11 se muestra una captura de pantalla de la interfaz de operación de la herramienta, esta interfaz pretende emular de la forma más realista posible el sistema de control y supervisión existente en las factorías,

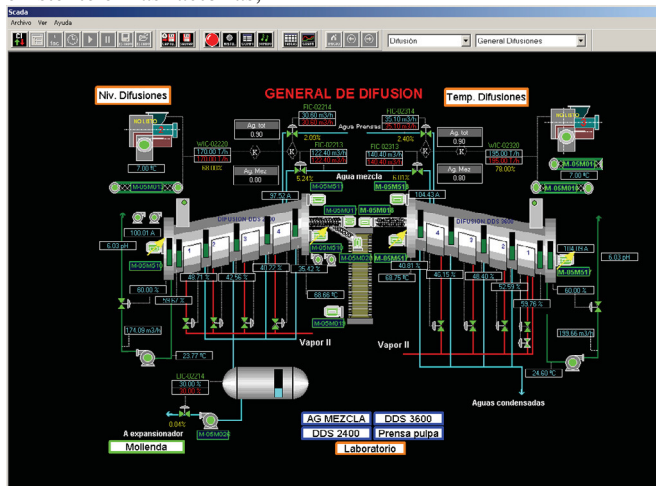


Figura 11. Captura de pantalla de la interfaz hombre máquina del simulador de entrenamiento de operadores.

Dado que los modelos desarrollados, son bastante detallados, resultan de utilidad en aplicaciones de optimización o rediseño tanto del proceso como de las estructuras de control. Permitiendo la realización de ensayos y tests sobre los datos que proporcionan los modelos de simulación.

En esta línea, en el CTA se está desarrollando una herramienta que permite la diagnosis y optimización energética de procesos azucareros (Merino *et al.* 2008) y que en sus fases de desarrollo utiliza como fuente de datos el modelo de planta completa construida con las librerías aquí descritas.

4. CONCLUSIONES

En este artículo se muestra el desarrollo de una librería de componentes para la construcción de modelos de la industria azucarera. Los modelos contenidos en esta librería son no-causales, están descritos en base a ecuaciones y eventos, cuya interfaz de usuario es la interfaz física del objeto que representan y permiten la generación de nuevos modelos por agregación de otros más básicos.

Se muestran en este artículo algunos de los detalles constructivos más interesantes que se han tenido en cuenta para el desarrollo de la librería. Estos detalles hacen que la librería sea fácilmente utilizable por usuarios no expertos en modelado y permiten, por otro lado, la reutilización y explotación de su estructura básica en otros campos.

Los principales aportes de esta librería son el hecho de incluir numerosos modelos dinámicos, pertenecientes a la industria azucarera y con la inclusión de malfunciones.

Esta librería ha sido utilizada con éxito en el desarrollo de varias herramientas útiles en el sector azucarero, como un simulador de entrenamiento de operadores y una herramienta de optimización energética en línea.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado en el CTA gracias a la financiación de las empresas azucareras españolas: Azucarera Ebro S. L. y ACOR. Así mismo los proyectos conducentes a la generación de modelos para la industria azucarera han sido financiados por los siguientes organismos públicos: Fondos Europeos para el desarrollo regional (FEDER), Ministerio de Ciencia y Tecnología de España y Junta de Castilla y León.

REFERENCIAS

- Acebes L. F. (1996). *SIMPD: Sistema Inteligente de Modelado de Sistemas Dinámicos*. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería de sistemas y Automática, Universidad de Valladolid.
- Acebes L.F. and Prada C. (1999). Process and control system design using dynamic simulation. *CITS Proceedings. Automation and Information Systems/ Heat economy/ Separation Technologies/ Environmental Problems*, Editorial Bartens, pp: 73-81.
- Alves R., Normey J. E., Merino A., Acebes L. F. and de Prada C. (2005). OPC based distributed real time simulation of complex continuous processes. *Simulation Modelling Practice and Theory*. Elsevier. **Vol 13/7**. pp 525-549.
- Aström K.J., Elmqvist H. and Mattsso S.E. (1998). Evolution of continuous-time modelling and simulation, *Proceedings of the 12th European Simulation Multiconference*, p. 9.
- Bubník Z., Kadlec P., Urban D., Bruhns M. (1995) *Sugar Technologists Manual: Chemical and Physical Data for Sugar Manufacturers and Users*. Ed. Bartens. Berlin.
- CAPE-OPEN (1999), Next Generation Computer-Aided Process Engineering Open Simulation Environment: Public Synthesis & Roadmap.
- Cellier E. F. and Kofman E. (1996). *Continuous System Simulation*. Ed. Springer, Estados Unidos.
- Dynasim (2008). <http://www.dynasim.se>
- EcosimPro (2009) by EA Internacional, Dynamic Modeling & Simulation Tool, [Online], <http://www.ecosimpro.com>

- Elmqvist H. (1978) *A Structured Model Language for Large Continuous Systems*. PhD. Thesis, Lund Institute of Technology, Department of Automatic Control, Lund, Sweden.
- Finlayson, B.A. (1980). *Nonlinear Analysis in Chemical Engineering*. McGraw-Hill, New York.
- Fritzson P. (2004) *Principles of Object Oriented Modelling and Simulation with Modelica 2.1*. Ed. Wiley-Interscience.
- Himmelblau, D.M. and Bischoff, K.B. (1976). *Análisis y Simulación de Procesos*. Ed. Reverté.
- ICIDCA 2009. Instituto Cubano de Investigaciones de los derivados de caña de azúcar, [Online], <http://www.icidca.cu>.
- Laganier F. (1996) Dynamic Process Simulation Trends and Perspectives in an Industrial Context. *Computers and Chemical Engineering*, Vol 20 Suppl., pp 1595 –1600.
- Mathcore (2008). <http://www.mathcore.com>
- Mc Ginnis R. A. (1982) *Beet sugar technology*. 3d Edition. Beet Sugar Development Foundation. Colorado, USA.
- Merino A. and Acebes L. F. (2003) Dynamic Simulation of an RT extractor. *ZuckerIndustrie*, 128 (2003), Nr 6, pags. 443-452.
- Merino A., Mazaeda R., Alves R., Rueda A., Acebes L.F. and de Prada C. (2006). Sugar factory simulator for operators training. *7th IFAC Symposium on Advances in Control Education (ACE06)*. Madrid, España.
- Merino A., Alves R., Acebes L.F, Mazaeda R., de Prada C. (2008) An Application for Energy Diagnosis in Sugar Plants. *Actas de FOODSIM2008*. Dublín (Irlanda).
- Merino A. (2008). *Librería de Modelos del Cuarto de Remolacha de una Industria Azucarera para un Simulador de Entrenamiento de Operarios*, Tesis Doctoral. Universidad de Valladolid.
- Modelica Association. (2005). *A Unified Object Oriented Language for Physical Systems Modelling*. Language Specification. Versión 2.2.
- OPC Foundation, [Online], <http://www.opcfoundation.org>.
- Paynter H. M. (1961). *Analysis and Design of Engineering Systems*. M.I.T. Press, Cambridge, Mass.
- Piera M. A. (1993) *PMT: Un Entorno de Modelado en la Industria de Procesos*. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Barcelona.
- Ramos J. J. (2003) *PML - A Modeling Language for Physical Knowledge Representation*. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Barcelona.
- Rimwall M. and Cellier F. (1986) Evolution and perspectives of simulation languages following the CSSL Standards. *Modelling Identification and Control*. Vol 6. No 4. 181-199.
- Schiesser W. E. (1991). *The numerical method of lines. Integration of Partial Differential Equations*. Ed. Academic Press, Inc.
- Sugars Internacional®. (2009) Software for modelling and simulation sugar factories. [Online], <http://www.sugaronline.com/>
- Van der Poel P. W., Schiweck H., Schwartz T. (1998) *Sugar Techonology: Beet and Cane Sugar Manufacture*. Ed. Bartens. Berlín.