

# SIMULADORES DE PROCESO PARA LA FORMACIÓN DE OPERARIOS DE SALA DE CONTROL DE FACTORIAS AZUCARERAS

Luis Felipe Acebes

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad de Valladolid  
Prado de la Magdalena s/n. 47011 Valladolid. España. Tel.: 983423563. felipe@cta.uva.es

Raúl Alves, Gloria Gutiérrez y Cesar de Prada.

## Resumen

*En este trabajo se hace una breve descripción del uso de la simulación para la formación de operarios de sala de control. Se expone la metodología de entrenamiento de operarios de fábricas azucareras que pretende realizarse en el Centro de Tecnología Azucarera (CTA) y se hace una descripción del simulador desarrollado en este Centro. En dicha descripción se hace especial hincapié en la estructura hardware y software y en concreto en la metodología y herramientas de modelado y simulación usadas.*

**Palabras Clave:** Formación de operarios. Simuladores de proceso. Simuladores de entrenamiento.

## 1 Introducción

### 1.1 Motivación

El proceso de producción del azúcar es complejo, consta de varias secciones de producción e involucra decenas de unidades de proceso continuas junto con otras que funcionan por lotes. Así, existen cientos de variables de proceso que deben ser monitorizadas y controladas. Como se refleja en la Figura 1, esta tarea requiere el uso de un sistema de control distribuido (DCS). Dicho sistema de control recibirá datos del proceso, directamente, y resultados de los análisis realizados en el laboratorio de la planta, generando un conjunto de señales de control que permiten gobernar el comportamiento de la planta.

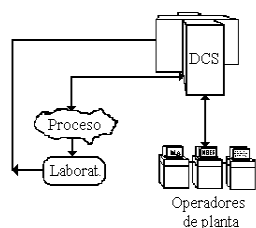


Figura 1



Figura 2. Operario de planta en una sala de control

Sin embargo, el problema no solo reside en controlar el proceso de producción, tarea que realiza el DCS, sino que este debe ser vigilado de un modo inteligente. Este proceso de vigilancia inteligente, que realiza el operario de planta interaccionando con el proceso a través del DCS (Figura 2), se puede dividir en dos tareas claramente diferenciadas:

- **Detección de fallos y anomalías en el proceso de producción.**

En ocasiones las fábricas de azúcar presentan problemas tales como obturaciones de válvulas, paradas de bombas, desbordamiento de depósitos, mal funcionamiento de evaporadores ... Problemas que no son frecuentes pero que deben ser detectados, mediante la observación de un conjunto de variables “claves”, y posteriormente solucionados de un modo rápido y preciso por los operarios de planta que están supervisando el proceso.

- **Operación del proceso.**

El proceso de fabricación del azúcar es un proceso continuo que está sometido a múltiples perturbaciones y cambios en el ritmo de producción. Así, es labor del operario de planta conocer el estado del proceso y determinar el valor de la referencia de un conjunto de lazos de control “claves”, existiendo lazos difíciles de controlar.

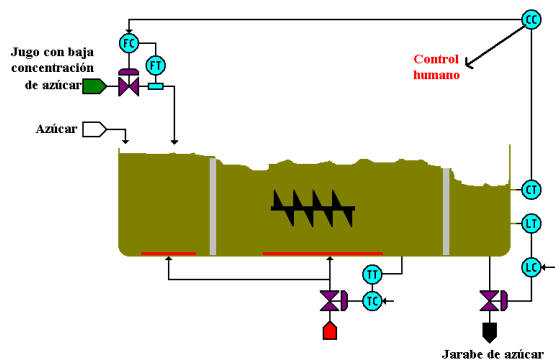


Figura 3. Un tipo de refundidora

En algunos casos el operario de planta no conoce lo suficientemente bien el proceso que está supervisando o sobre el que está actuando, de tal forma que su actuación es deficiente. Esta afirmación se hace patente en el control de la concentración de azúcar del jarabe que se extrae de una refundidora (Figura 3). El operario de planta debe manipular la señal de control que actúa sobre la válvula que gobierna la cantidad de jugo, de bajo contenido en azúcar que entra a la refundidora, para mantener la concentración de salida dentro de unos límites razonables. Este proceso es especialmente difícil de controlar, ya que el jugo diluido se añade por un extremo de la refundidora y la salida está situada en el otro extremo y dado que el volumen de la refundidora es muy grande, existe un desfase importante entre la acción de control y la medida del proceso. En la industria azucarera los operarios de planta supervisan el proceso de forma continua por turnos (8 horas), en la Figura 4 se observa que en uno de los turnos existe un operario que no conoce todo lo bien que sería de desear el proceso que tiene lugar en la refundidora. El operario de los turnos 2, 5 y 8 mantiene una acción de control demasiado activa y obtiene un peor control que los otros operarios, posiblemente sea debido a que no conoce bien la dinámica del proceso que sucede en la refundidora. Conseguir que este operario cambie su modo de actuar es una tarea compleja, debido a que las demandas de productividad y seguridad no aconsejan que se experimente con la planta, además es posible que sea reacio a cambiar su modo de operar, temiendo que al cambiarlo pueda provocar una catástrofe.

Una solución para ayudar a evitar estos problemas es utilizar técnicas de supervisión y control avanzadas, de tal forma que se superponga una capa entre el DCS y el operario de planta, automatizando muchas de las tareas que realiza el operario. Entre estas técnicas pueden citarse el uso de sistemas expertos para la detección y diagnóstico de fallos [4] y el uso de algoritmos de control avanzados como el GPC con restricciones [6]. Con este algoritmo de control puede abordarse el problema de generar consignas óptimas en sistemas MIMO de dinámicas complejas y con perturbaciones externas.

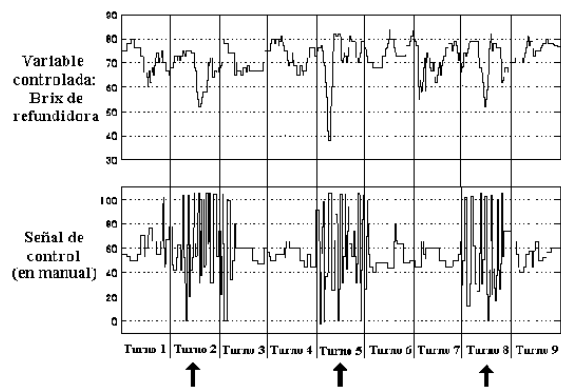


Figura 4

Estas técnicas pueden considerarse un soporte para el operario, haciéndole más fácil su trabajo, desde el momento en que reducen la intensidad con la que debe supervisar el proceso. Sin embargo, no eliminan la necesidad de incrementar el conocimiento de los operarios sobre el proceso de producción, ya que si se consigue extender ese conocimiento, se conseguirán mejoras en la productividad y calidad del producto. Para incrementar dicho conocimiento la técnica más idónea es el entrenamiento de operarios mediante técnicas de simulación.

## 1.2 Simuladores de proceso para la formación de operarios de sala de control

Cuando alguien imagina un simulador de proceso, la imagen que generalmente le viene a la mente es una réplica de la sala de control, llena de pantallas, y comunicada con enormes ordenadores en los que se están ejecutando simulaciones muy detalladas del proceso. Este tipo de simuladores han sido usados durante años en industrias muy críticas como las plantas nucleares o las refinerías de petróleo, tanto para entrenamiento de personal como para mejorar el proceso de producción. Sin embargo su costo, tanto humano como económico, no ha permitido que su uso se haya extendido a otras industria de proceso.

La situación está cambiando, se han producido avances significativos tanto en los aspectos asociados al *hardware* que soporta al simulador, como al desarrollo del *software* que permite la simulación del proceso. Esto, está teniendo un impacto muy fuerte en muchas aplicaciones industriales, más aún, el uso de modelos de simulación para el diseño de procesos de producción ha permitido la reutilización y actualización de dichos modelos, a un bajo costo, para destinarlos a funciones de entrenamiento.

Se pueden distinguir dos tipos de simuladores en la industria de procesos (Figura 5), los simuladores orientados al diseño de instalaciones (DS, Design Simulators), o los simuladores de entrenamiento (PTS, Process Training Simulators) [10].

Dentro de los PTS existen dos tipos:

- Los FSS (Full Scale Simulators) o simuladores de alcance total que reproducen completamente el entorno de operación. Estos simuladores están asociados a una réplica de la sala de control (CCR, Central Control Room), tanto en apariencia como en funciones.
- Los MFDS (Model Forward for Design Simulators), simuladores que reproducen la conducta del proceso, pero no reproducen la CCR, aunque, sin embargo, se puede actuar sobre la simulación en tiempo de ejecución. En esencia este tipo de simuladores son DS a los que se les ha dotado de una interfaz en tiempo de ejecución (RTI, Run Time Interface) que permite al usuario observar valores de variables y modificar parámetros a medida que la solución del sistema progresa.

Debe notarse que los FSS por definición tienen asociada una o varias consolas de operario, que son el lugar desde el cual el operario actúa sobre la simulación de la misma forma que actuaría sobre la planta. La consola de operario se puede clasificar en tres tipos:

- **Reproducción**, reproduce la consola del operario aunque no es la original.
- **Emulación**, emula la mayoría de las funciones de la consola original pero puede ser diferente en algunos aspectos.
- **Estimulación**, es idéntica a la consola original.

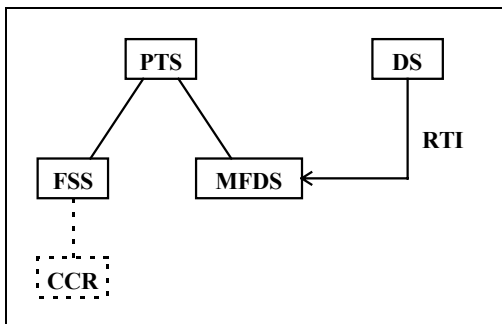


Figura 5

A pesar de las ventajas que ofrecen los FSS en la industria de proceso su uso no se ha extendido todo lo que sería deseable debido al coste humano y económico que llevan asociados. Dicho coste es función de:

- La dificultad para desarrollar un modelo de la planta, a partir de datos de su configuración física e información de sus componentes, con una fidelidad adecuada.
- La necesidad de desarrollar sofisticadas interfaces de usuario.
- Unida a las dos anteriores existe la limitación de que el hardware y el software está desarrollado a la medida de una aplicación concreta, con lo que resulta difícil su mantenimiento y actualización.

De acuerdo con las razones expuestas, tradicionalmente, el desarrollo y mantenimiento de un FSS requiere muchas horas-hombre, por lo que sería deseable desarrollar herramientas que automatizarán muchas de las tareas asociadas al desarrollo y mantenimiento de un FSS. Además el desarrollo de un FSS no es el final de un entrenamiento basado en ordenadores sino que es solamente el principio. Esto es así porque una vez desarrollado el simulador de entrenamiento debe de realizarse un riguroso programa de entrenamiento en función de la planta simulada, dicho programa puede exigir diferentes estrategias de entrenamiento y evaluación.

## 2 Entrenamiento de operarios de factorías azucareras

### 2.1 Perspectivas de uso de los FSS y los MFDS

Como puede imaginarse, los FSS son muy extensos tanto en funcionalidades del simulador como en detalles de la planta modelada. Sin embargo, a pesar de sus deseables beneficios a nivel económico, de seguridad y logística, se hace difícil justificar su alto costo, por lo que en algunos casos un MFDS, que lleva asociado un coste menor, puede resultar suficiente. A continuación se discuten las diferentes posibilidades y diferencias entre los FSS y los MFDS.

Los FSS replican la CCR, pudiendo ser entrenados varios operarios simultáneamente. Así los FSS son apropiados para el entrenamiento de personal que necesita una réplica exacta del entorno de trabajo real y donde la improvisación debe de ser evitada. Además, los FSS cubren el rango de operación desde el arranque a las paradas de emergencia, pasando por la respuesta a perturbaciones y averías. Los MFDS serán usados para el entrenamiento en un rango de operación normal. Finalmente, los FSS son apropiados para familiarizar a los operarios con la forma en las que se les presentará la información. Por el contrario, el uso de un MFDS requiere cierta improvisación a cargo del instruido, de modo que sea capaz de relacionar el modelo en ejecución con la situación real. Así, los MFDS son más apropiados para la formación de operarios avanzados, supervisores de proceso e ingenieros de control y proceso.

En los MFDS la especificación de ejecución en tiempo real de los FSS es sustituida por una interfaz en tiempo de ejecución que permite al usuario trabajar en tiempo real, más rápido o más lento del tiempo real o en una proporción constante al tiempo real. Por otro lado, la fidelidad del modelo y la velocidad de ejecución son variables contradictorias. Para que el sistema se ejecute en tiempo real, especificación básica de los FSS, suele ser necesario que el nivel de detalle del modelo matemático sea inferior al que tendría un modelo orientado hacia el diseño. Por

definición los MFDS tienen la misma fidelidad que los DS, y su comportamiento en tiempo real dependerá de la complejidad del modelo usado y de la plataforma sobre la que se está ejecutando.

Si se analiza la posibilidad de simular operaciones de campo o averías, se encuentra que desde los FSS se puede hacer fácilmente sin más que tener una interfaz de instructor adecuada. Sin embargo, en los MFDS deberán añadirse ecuaciones adicionales en el modelo de tal forma que se puedan simular anomalías, por otro lado está la dificultad para activar y desactivar esas anomalías desde la RTI.

Como puede deducirse de la anterior discusión, los FSS y los MFDS no son excluyentes, sino que se complementan, el uso de unos u otros dependerá fundamentalmente de la estrategia de entrenamiento, del usuario final y de las posibilidades económicas de la empresa.

## 2.2 Entrenamiento de operarios en el CTA

El entrenamiento de un operario de planta no es algo sencillo, ya que las tareas básicas del operario de planta (monitorizar, controlar, interpretar y diagnosticar) no son fáciles de enseñar. La actividad del operario de planta ha evolucionado de igual forma que lo han hecho los sistemas de control. Su actividad ha discurrido desde una actuación en manual sobre el proceso a una supervisión del sistema de control. Así, actualmente, la función del operario requiere la toma de decisiones y alguna actividad intelectual que requiera el conocimiento preciso del sistema sobre el que está actuando. Por tanto, el entrenamiento de los operarios de planta debe realizarse en dos niveles diferentes:

- Familiarización con el sistema de control y los procedimientos de operación del mismo
- Operación sobre el proceso y detección de fallos.

El Centro de Tecnología Azucarera (CTA), lleva varios años trabajando en la formación del personal de la sala de control de la industria azucarera. En este sentido su línea fundamental de trabajo se ha centrado en el modelado y simulación del proceso productivo, el desarrollo de interfaces para el manejo de la simulación y la emulación de la sala de control, ejecución en tiempo real de la simulación y desarrollo de las comunicaciones entre las simulaciones y las interfaces que soportan su manejo.

Además del desarrollo del software mencionado y de la correspondiente investigación en temas de modelado y simulación, sistemas de control distribuido, comunicaciones y tiempo real. Se está desarrollando una estrategia de entrenamiento de operarios sobre la base del uso de las técnicas de simulación junto con sesiones teóricas en las que se explican fundamentos físico-químicos, conceptos básicos de control y manejo del sistema de control.

Así, como ejemplo, la propuesta de entrenamiento de un operario en una sección de evaporación consta de las siguientes actividades (Tabla 1):

Sesión	Contenido	Duración	Herramientas
Sesión teórica I	Principios físicos de la evaporación y de regulación	1 hora	
Sesión práctica I	Principios físicos de la evaporación y de regulación	1 hora	MFDS de unidades de proceso (depósitos, intercambiadores de calor y evaporadores)
Sesión teórica II	Estaciones de evaporación	1 hora	
Sesión práctica II	Estaciones de evaporación	1 hora	MFDS de la sección de evaporación
Sesión teórica III	Descripción general de la interfaz del sistema de control	30 min.	
Sesión práctica III	Gestión óptima del proceso de evaporación y detección de anomalías	3 h y 30 min.	FSS que emula la CCR de una factoría azucarera y con el motor de simulación de una sección de evaporación
Revisión	Análisis de los resultados con el instructor	2 h	

Tabla 1

Como puede verse en las sesiones prácticas se recurre al uso de dos tipos de simuladores diferentes, unos del tipo MFDS y otro del tipo FSS.

Los simuladores del tipo MFDS son módulos de simulación que se ejecutan tan rápido como sea posible y disponen de una interfaz de manejo de la simulación desde la que se pueden cambiar los parámetros más importantes del sistema simulado (Figura 6). Existen dos tipos de módulos, unos en los que el operario cambia los parámetros del modelo, simula un intervalo de tiempo, vuelve a cambiar los parámetros del modelo, vuelve a simular y así sucesivamente hasta que se alcanza la condición de finalización de la simulación (que generalmente es por tiempo máximo). En el segundo tipo de módulos, el alumno modifica valores de los parámetros del modelo y ejecuta algún experimento predefinido. En ambos tipos de módulos los resultados se presentan de un modo gráfico.

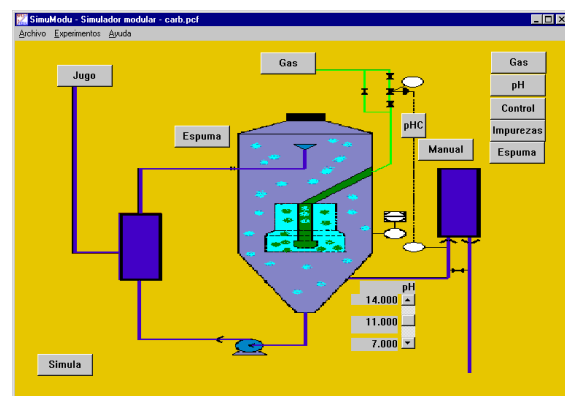


Figura 6

El simulador del tipo FSS que se utiliza en la sesión práctica III, es un simulador que emula la sala de control de una factoría azucarera (Figura 7). Desde un punto de vista funcional se tiene una simulación en tiempo real que emula el comportamiento del proceso, una o varias consolas de operario, una interfaz de instructor desde la cual se dirige el entrenamiento y un sistema de proyección de imágenes dirigido por el instructor y desde el que se proyectan los sinópticos, fotografías o videos que el instructor considera relevantes.



Figura 7

### 3 El simulador de entrenamiento de sala de control

#### 3.1 Arquitectura hardware y software

Actualmente se dispone de dos arquitecturas diferentes (Figura 8), una en la que coexisten máquinas UNIX y Windows NT y otra en la que solamente se utilizan máquinas con el sistema operativo WINDOWS NT.

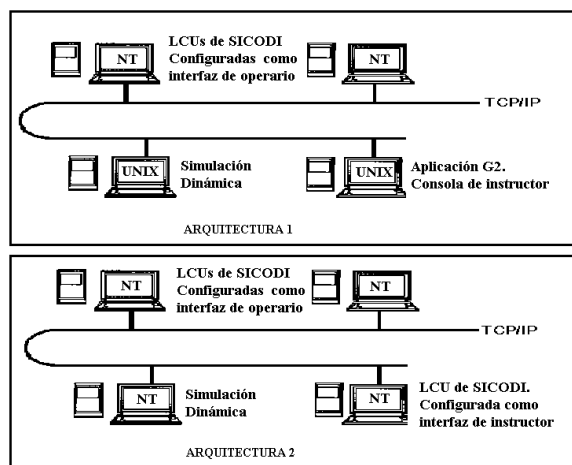


Figura 8

La primera arquitectura [1], la más antigua, utiliza un sistema de control distribuido (SICODI [8]) desarrollado en el CTA como consola de operario. Dicho sistema de control dispone de varias unidades de control local (LCUs) que pueden compartir información. Existe un programa de enlace soportado, por una máquina UNIX, que controla la ejecución en tiempo real y comunica el sistema de control con la simulación dinámica (programa ACSL [5] que se ejecuta en una estación de trabajo UNIX) y con la consola de instructor (desarrollada usando G2 [9] y ejecutándose en una estación de trabajo UNIX).

En la segunda arquitectura, SICODI sigue actuando como interfaz de operario, pero ahora el programa de enlace se ha modificado de modo que ahora reside en una máquina Windows NT, la simulación se ejecuta en ese mismo entorno y una de las LCUs puede configurarse en modo consola de instructor sustituyendo a la aplicación desarrollada en G2 para la anterior arquitectura.

#### 3.2 Simulación dinámica

El motor de simulación de los FSS y los MFDS desarrollados es un programa de ordenador que resuelve un sistema de ODES (Ordinary Differential Equations) que modelan el comportamiento dinámico del sistema simulado. Estos modelos deben representar el proceso de fabricación del azúcar de un modo fiable por lo que se recurre a modelos de primeros principios o modelos de conocimiento.

Evidentemente es posible desarrollar un programa de simulación usando un lenguaje de programación de alto nivel más un conjunto de rutinas para integrar ecuaciones diferenciales. Sin embargo, no es la metodología más adecuada debido al coste humano (conocimientos de programación y cálculo numérico) y temporal que conlleva desarrollar programas de simulación de esta forma. Por esta razón se decidió usar un lenguaje de simulación que permitiese escribir el modelo de simulación con una sintaxis lo más próxima al conjunto de ecuaciones que lo describen y evitar los problemas de programación y de uso de las rutinas de integración. Inicialmente el lenguaje seleccionado fue ACSL (Advanced Continuous Simulation Language).

ACSL es un buen lenguaje de simulación que estructura el modelo matemático de un modo monolítico en tres regiones (inicial, dinámica y terminal) y con una sintaxis muy sencilla. Sin embargo el mayor problema es que está desarrollado según el estándar CSSL'67, que aunque incorpora estructuras de programación para modularizar la escritura del código de simulación (MACROS) no permite descomponer el sistema modelado de un modo modular y por tanto no permite la reutilización de modelos [10]. Siendo la reutilización de modelos un punto crucial si se quiere disponer de una herramienta de formación flexible que permita poder



modificar con facilidad el programa de simulación de modo que se puedan simular diferentes fábricas.

En este proyecto la reutilización de modelos se ha abordado de dos modos diferentes. El primero consiste en el desarrollo de un prototipo de entorno de modelado gráfico denominado SIMPD (Sistema Inteligente de Modelado de Procesos Dinámicos [2]), implementado usando G2 y que genera el modelo de simulación de un proceso en lenguaje ACSL a partir de una descripción gráfica de su P&I (Figura 9). SIMPD es una herramienta de modelado que por medio de reglas que codifican el modo de razonar de un experto en modelado genera modelos de simulación eficientes, permitiendo la parametrización y ejecución de la simulación desde la interfaz de diseño.

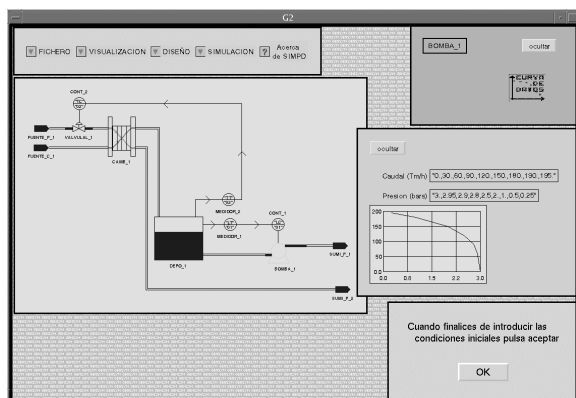


Figura 9

La segunda opción [3] consiste en utilizar una herramienta de modelado dentro del grupo de los OOML (Object Oriented Modelling Languages), en particular se ha seleccionado EcosimPro [7]. Estas herramientas permiten descomponer un modelo de un modo jerárquico y generar el código de simulación a partir de la manipulación simbólica de las ecuaciones que describen los modelos componentes y de las ecuaciones asociadas a los elementos de conexión. Esta descomposición jerárquica del modelo permite desarrollar librerías de modelos componentes (Figura 10), que puedan ser utilizadas para describir distintos procesos productivos. Como ejemplo en la Figura 11 se tiene la sección de cristalización de una factoría.

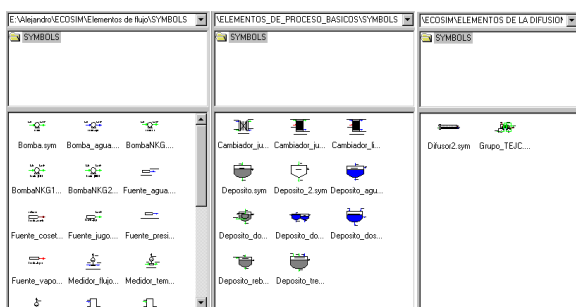


Figura 10

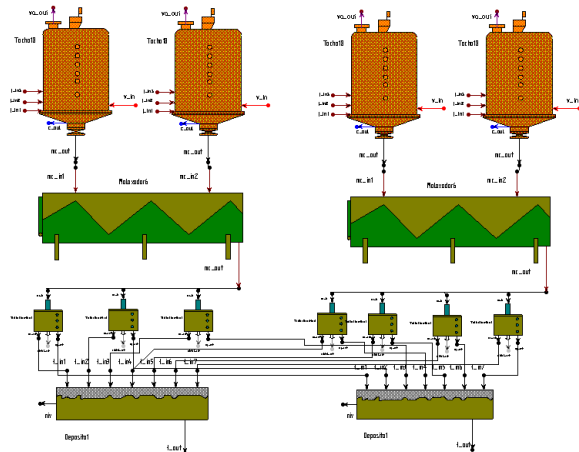


Figura 11

EcosimPro se ha seleccionado como herramienta de simulación porque, además de permitir el desarrollo de librerías y la reutilización de modelos, el modelo de simulación es generado como una clase C++ que junto con las rutinas de integración es fácil de incluir en otra aplicación software. Esta facilidad permite desarrollar ejecutables que simulen el comportamiento del sistema en tiempo real o acelerado y con capacidad de servidor de datos OPC (OLE for Process Control). El uso del estándar OPC [12] permite que la simulación se comunique con cualquier cliente OPC genérico, ya sea un sistemas de control distribuido, un SCADA, un controlador, otra simulación ...facilitando la reutilización del código de simulación en múltiples aplicaciones.

### 3.3 Entorno de operación y supervisión

Como se describe en el punto 3.1, el sistema de control SICODI, que es configurable, actúa como consola de operario o como consola de instructor.

Como consola de operario permite la actuación del mismo modo que en el proceso real:

- Navegación por sinópticos.
- Presentación de resultados, de modo gráfico y en tablas.
- Actuación del operario (cambiando consignas o manipulando señales de control en manual) y en ocasiones el cambio de los valores de los parámetros de los reguladores.

Como consola de instructor permite:

- Las mismas funciones que al operario.
- La actuación manual sobre el proceso. Seleccionando unidades de proceso tanto a través de sinópticos (Figura 12) como de menús de usuario (Figura 14) en los que dichas unidades están organizadas jerárquicamente por secciones de producción y por tipo de unidad.

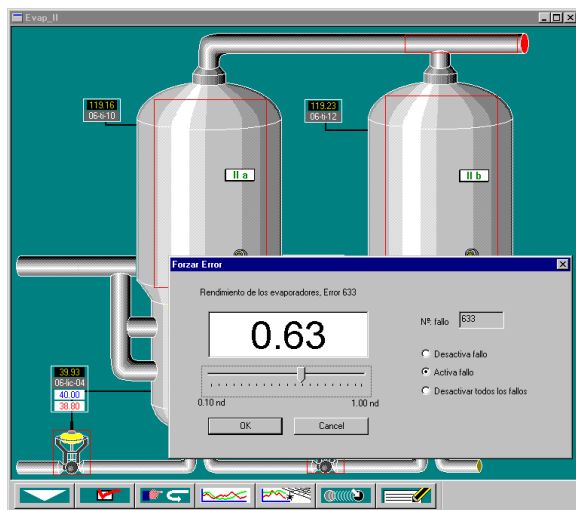


Figura 12

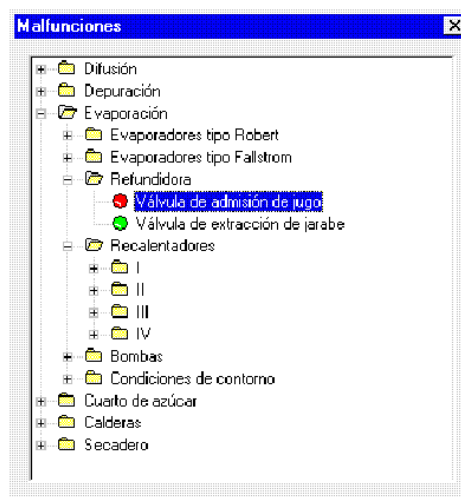


Figura 14

- La selección, creación y grabación de sesiones de entrenamiento (Figura 13) en las que se concatenan fallos y cambios en las condiciones de contorno.
- La activación y proyección de videos y sinópticos para suministrar al operario información adicional o para marcar alguna pauta dentro del desarrollo del entrenamiento.

Al finalizar la sesión de entrenamiento los resultados están disponibles en los históricos del sistema de control para que puedan ser analizados y comentados por el instructor y el operario.

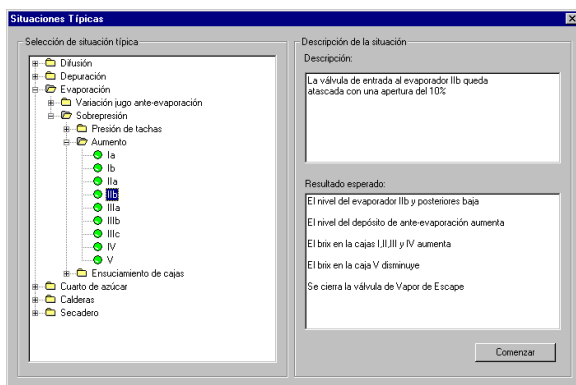


Figura 13

#### 4 Equipo de desarrollo y líneas de trabajo actual y futuro

El proyecto se desarrolla en el CTA (Universidad de Valladolid), bajo la financiación de dicho Centro y por el Ministerio de Ciencia y Tecnología a través de Fondos FEDER (TAP 1FD97-1450).

El equipo de desarrollo es multidisciplinar (físicos, informáticos, matemáticos e ingenieros químicos) y está formado por seis personas con dedicación completa y otras cinco personas que colaboran en tareas de dirección y supervisión, siendo las líneas de trabajo diversas:

- Desarrollo, en EcosimPro, de una librería de modelos dinámicos de unidades de proceso y productos azucareros.
- Construir los modelos de las secciones de una fábrica de referencia, y validarlos con datos experimentales y con conocimientos de expertos.
- Dotar a la simulación de cada sección de una interfaz OPC y capacidad de ejecución en tiempo real.
- Configurar SICODI para las distintas secciones productivas, tanto como consola de operario como consola de instructor.
- Desarrollo propios en SICODI.
- Comunicar las simulaciones de cada sección de modo que cooperen de un modo distribuido.
- Desarrollar las sesiones de entrenamiento y sus correspondientes manuales.

## Referencias

- [1] Acebes (1995). A Simulator to Train Plant Operatos of a Beet-sugar Factory. Proceedings of the IMACS Symposium on Systems Analysis and Simulation. Berlin 26-30 June 1995, 659-662.
- [2] Acebes (1996). "SIMPDI: Sistema Inteligente de Modelado de Procesos Dinámicos". Tesis Doctoral. Universidad de Valladolid, España. 1996.
- [3] Acebes (2001). Desarrollo de una librería de modelos de unidades de proceso de la industria azucarera. Wokshop en Metodología de Modelado y Simulación de Sistemas. Barcelona, España, 2001.
- [4] Acosta (1995). Sistemas Basados en Conocimiento para Supervisión y Diagnosis de Procesos Continuos. Tesis Doctoral. Universidad de Valladolid, 1995.
- [5] Advanced Continuous Simulation Language (ACSL) Reference Manual, Edition 11.1. MGA Software, USA 1995.
- [6] EcomsimPro. Users Manual v3.1, Empresarios Agrupados International and ESA, Spain, 2000.
- [7] Alvarez (1997). Gestión de restricciones en controladores predictivos. Tesis Doctoral. Universidad de Valladolid, 1997.
- [8] García (1999)."SICODI: A Configurable Real-Time Distributed Control System". 7 th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation ETFA'99. Barcelona, octubre de 1999.
- [9] G2 Reference Manual, 1998, Gensym Corporation, Cambridge MA, 1998.
- [10] Huber (1994). Modelado Modular y Jerárquico de Sistemas de Tiempo Continuo. XIV Curso de Automática en la Industria. Junio 1994.
- [11] Malik, 1995/96. T.I. Process Training Simulators (PTS), a comparison of different types. Measurement+control, Volume 28, December/January 1995/96.
- [12] OPC Foundation. <http://www.opcfoundation.org>.