

# ENTORNO DE AYUDA A LA OPERACIÓN DE UNA PLANTA PILOTO DE LABORATORIO

Luis Felipe Acebes

Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática. Escuela Universitaria Politécnica. Universidad de Valladolid

C/ Francisco Mendizabal nº 1, 47014. Valladolid

felipe@cta.uva.es

David Castrillejo, Fermín Oliveira & Raúl Alves

## Resumen

*Alrededor de tecnologías de modelado y simulación de sistemas continuos y de implementación de SCADAs, se plantea el desarrollo de un sistema software basado en simulación predictiva que sirva como herramienta de soporte para la actuación en una planta piloto termohidráulica.*

**Palabras Clave:** Simulación predictiva, Modelado de sistemas continuos, SCADA.

## 1 INTRODUCCIÓN

Existe la certeza de que las técnicas de simulación digital dinámica jugarán un papel muy importante en la consecución de una operación óptima y eficiente de plantas de proceso. Existen tres tipos diferentes de sistemas basados en técnicas de simulación que persiguen ese objetivo, pero con distintos propósitos:

- Primero, aquellos orientados al diseño y análisis de procesos: examinar y mejorar estrategias de control para plantas nuevas o ya existentes; examinar la reestructuración de plantas ya existentes; desarrollar e inspeccionar sistemas de control avanzados; e investigar el control de las secuencias de operación de procesos *batch*.
- Segundo, los orientados a la formación de personal (operadores de planta e ingenieros).
- Tercero, los sistemas en los que los resultados obtenidos por técnicas de simulación se aplican de forma inmediata a las operaciones de planta actuales. Estos sistemas, que están basados en técnicas de **simulación predictiva**, se orientan a optimizar las condiciones de operación durante situaciones de emergencia o poco habituales.

En el caso de los sistemas basados en simulación predictiva existen tres puntos cruciales a tener en cuenta en su desarrollo y aplicación:

- El modelado del proceso productivo y de su sistema de control.

En la actualidad las técnicas de simulación digital están bien consolidadas, por el contrario las técnicas de modelado están en continua evolución siendo las herramientas de modelado orientado a objetos (OOML) el reflejo del estado del arte actual de esta tecnología. Estas herramientas soportan los paradigmas de modelado modular y jerárquico y permite de un modo sencillo la reconfiguración y reutilización de modelos sin la necesidad de que el usuario sea un experto en modelado. De modo que la construcción de un modelo de un proceso continuo se limita a la selección, desde una librería de modelos predefinida, e interconexión de los modelos de las unidades elementales que lo componen y su posterior parametrización [10].

- La estimación de parámetros y del estado inicial del sistema.

La parametrización del modelo de simulación de un sistema requiere disponer de suficientes datos técnicos sobre el proceso a simular, además de registros de datos de proceso. De modo que la mayoría de los parámetros del modelo se obtengan a partir de la documentación técnica y el resto de parámetros puedan obtenerse bien por técnicas basadas en balances estacionarios del proceso o bien por técnicas de identificación (optimización numérica) [8], [9] y [14].

Por otro lado, el modelo de simulación de un sistema requiere que le especifiquen el estado inicial del cual debe partir para realizar el correspondiente experimento de simulación. La estimación del estado inicial del modelo de simulación es un punto clave en los sistemas

orientados a la simulación predictiva y para ello es preciso disponer de suficientes medidas de calidad del proceso real y recurrir a herramientas informáticas basadas en simulación (dinámica o estática).

- La integración del modelo de la planta con computadores funcionando en tiempo real.

Debe dotarse a los motores de simulación de potentes interfaces que permitan el intercambio de datos con computadores funcionando en tiempo real (y las correspondientes aplicaciones informáticas para la gestión de los datos). En los sistemas operativos Windows®, y en el ámbito del control de procesos, OPC (OLE for Process Control) es un estándar de *facto* que facilita la comunicación entre aplicaciones informáticas y dispositivos de campo [12].

En este artículo se presenta un sistema software basado en simulación predictiva que sirve como herramienta de soporte para la actuación en una planta de piloto de proceso continuo ante situaciones anómalas o poco conocidas (Figura 1). Esta aplicación informática se integra dentro de un SCADA, de modo que, primero permite especificar el experimento a desarrollar, segundo estima el estado inicial de la planta a partir de valores medidos del proceso, tercero determina la configuración de la misma y cuarto simula el comportamiento dinámico de dicha planta piloto y presenta los resultados.

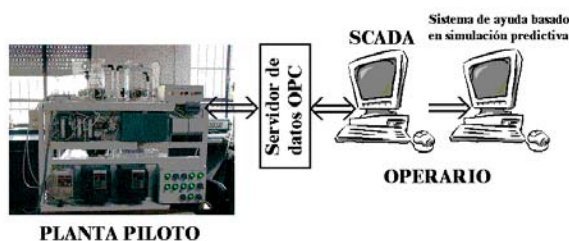


Figura 1

Así, primero se describe la planta piloto y el SCADA de la misma. Segundo se describe el modelo de simulación de la planta, desarrollado usando el entorno de modelado y simulación EcosimPro [5] y la parametrización de dicho modelo. Tercero, se presenta la aplicación desarrollada, en particular el módulo de estimación del estado inicial y las comunicaciones entre módulos basadas en el interfaz OPC. Finalmente se expone las conclusiones y el trabajo futuro.

## 2 PLANTA PILOTO

La planta, ubicada en el Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Valladolid, está diseñada para tratar agua a diferentes temperaturas, puede configurarse en diversos modos de funcionamiento (activando bombas de recirculación y resistencias

eléctricas) y permite la simulación de anomalías, activando caudales de fugas y permitiendo el bloqueo de tuberías (Figura 2).



Figura 2

Observando el diagrama del proceso de la Figura 3, podemos resumir su modo normal de funcionamiento diciendo que el agua entra de la calle a un primer depósito en el que se controla el nivel de líquido con el caudal de salida por la línea de flujo LF2. Desde ese depósito se suministra agua a otros dos depósitos menores y situados a un nivel superior (en los que se puede calentar el agua que almacenan, activando unas resistencias eléctricas). Desde esos depósitos por rebose (LF4 y LF5) se suministra el agua a un cuarto depósito situado al mismo nivel que el primero, en el que también se controla el nivel de líquido con el flujo de agua que se envía al exterior, LF6. Finalmente, desde los dos depósitos situados a un nivel superior se puede realimentar agua al primer depósito activando las correspondientes bombas centrífugas.

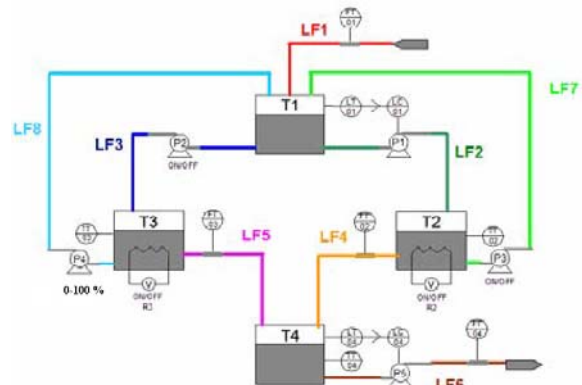


Figura 3

Existen medidas de flujo volumétrico en las líneas LF1, LF4, LF5 y LF6; de temperatura en los depósitos T2, T3 y T4; y de nivel en los depósitos T1 y T4.

La planta se supervisa y se controla con una aplicación SCADA desarrollando usando el software

FactorySuite™ de Wonderware© (Figura 4). En particular el sistema de supervisión está implementado usando la aplicación InTouch®, el sistema de control (dos lazos PID para el control de los niveles de los depósitos) se implementa usando InControl® y la toma de datos de la planta se realiza a través de la aplicación OPCLink®, que actúa como cliente OPC que recibe los datos de dos servidores OPC (conectados a las tarjetas de adquisición de datos) y como servidor de datos para WindowViewer (InTouch).

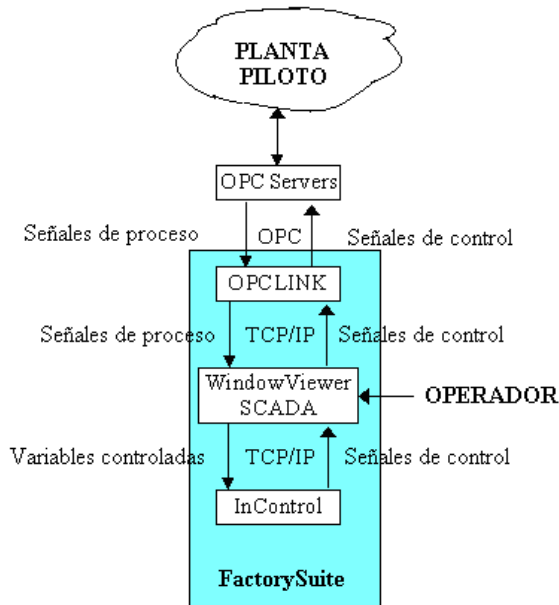


Figura 4

Detalles sobre la construcción de la planta piloto pueden encontrarse en [3]. Asimismo, información adicional sobre la implementación del sistema SCADA y su funcionalidad puede ser obtenida de [6], [7] y [13].

## 2 MODELADO Y SIMULACIÓN DINÁMICA DE LA PLANTA PILOTO

Una vez construida la planta e implementado el sistema SCADA para la supervisión y control de la misma es necesario acometer el desarrollo del módulo de asistencia al operador en base a simulación predictiva. Para ello es necesario desarrollar un motor de simulación dinámica de la planta que pueda predecir el comportamiento de la misma. Este programa de simulación debe cumplir las siguientes características:

- La simulación debe ajustarse tanto como sea posible a la conducta real de la planta, siendo la mejor elección un modelo de primeros principios dinámico. Ese modelo debe

parametrizarse de acuerdo a la planta que representa.

- El código de simulación generado debe permitir que se le añadan funcionalidades para comunicarse con el sistema SCADA.
- El motor de simulación se debe poder usar con un doble objetivo, primero reemplazar a la planta piloto (de modo que puedan hacerse pruebas de desarrollo del módulo de asistencia a la operación sin necesidad de consumir energía eléctrica y agua) y actuar como simulador predictivo. Así debe dotarse al motor de simulación la capacidad de funcionamiento en tiempo real y tiempo escalado.

Esto implica que deben usarse dos modelos ligeramente diferentes uno sin considerar el sistema de control (aquel que reemplaza a la planta piloto) y otro considerando la el sistema de control (aquel que debe hacer predicciones en un tiempo escalado, más rápido que el real).

- Debe ser posible especificar el estado inicial y la configuración de la planta, así como los eventos que se van a ejecutar en cada ensayo del simulador predictivo.

Con estos condicionantes se seleccionó como herramienta de modelado y simulación EcosimPro. Por varias razones:

- Lenguaje de modelado orientado al desarrollo de modelos basados en ODEs y DAEs, que son la base de los modelos de conocimiento o primeros principios.
- Soporta el paradigma de modelado orientado a objetos (OOML, *Object Oriented Modelling Languages*). Dada la sencillez de la planta en este caso sólo se utilizará para tener dos modelos componentes relacionados por herencia, la planta piloto sin control y con control.
- Como núcleo del programa de simulación genera una clase C++ que puede ser incluida dentro de una aplicación de modo que al programa de simulación resultante se le dote de las capacidades de simulación en tiempo real, y escalado, y de comunicaciones antes mencionadas.
- Además, mediante el lenguaje de experimentos de *EcosimPro* se puede especificar de un modo sencillo la selección del estado inicial.

Finalmente, y dado que la comunicación entre la planta piloto y el SCADA está basada en OPC, decidimos usar ese mismo estándar para comunicar el simulador (en sus dos versiones) con el sistema SCADA.

## 2.1 MODELO MATEMÁTICO

Como ya se ha indicado, el tipo de modelo matemático de la planta piloto es de primeros principios, con las siguientes características:

- Balances de masa y energía, de parámetros concentrados, en los cuatro depósitos.
- Las conducciones ó líneas de flujo se modelan de modo global y empírico. De modo que en aquellas que contienen una bomba centrífuga el caudal depende de la señal de control de la bomba y de un coeficiente relacionado con su obturación (total, parcial o no bloqueada). En el resto, el caudal depende de la altura de líquido en el depósito origen de la línea, y de un coeficiente relacionado con la obturación de las mismas. Adicionalmente se consideran ecuaciones empíricas para las fugas en los depósitos (totales, parciales o nulas).
- El modelo, con respecto a la materia prima, consta de dos condiciones de contorno: caudal y temperatura del fluido de entrada a la planta.
- Existen variables de configuración de la planta: referencias de los lazos de control (o señales de control cuando el lazo de regulación está en manual) y activación de bombas y resistencias.
- Existen variables de perturbación o fallo: obturación de conducciones y fugas en depósitos.

En [4] puede encontrar el modelo matemático desarrollado en EcosimPro, así como la parametrización y validación de dicho modelo que se detallan a continuación.

## 2.2 PARAMETRIZACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

Para parametrizar el modelo se disponen de las dimensiones de los depósitos, y mediante ensayos se obtienen las ecuaciones empíricas que modelan los caudales de las líneas de flujo y los valores de las resistencias eléctricas y los coeficientes de pérdidas de calor con el entorno de los depósitos.

Para determinar las ecuaciones empíricas que modelan los caudales de las líneas de flujo se realizaron ensayos del siguiente tipo:

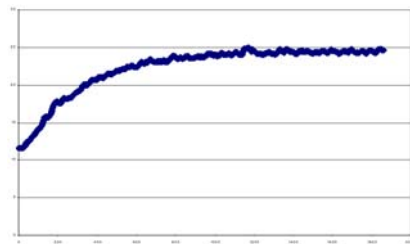
- Seleccionado un depósito se cierran todas las salidas, se llena el depósito y se selecciona una línea de flujo de salida de líquido (todas las demás se cierran).
- Se registra el caudal (directa o indirectamente, con la medida de la variación de volumen a lo largo del tiempo) y el nivel en el depósito. Para cada línea de flujo se hacen

diversos experimentos, variando la señal de control de la bomba (que permanece constante a lo largo de todo el experimento) y variando la obturación de la tubería (usando válvulas manuales dispuestas en la planta piloto).

- Se ajusta una ecuación que relacione el caudal con el nivel del depósito (si tal dependencia es notable), la señal de control de la bomba (si existe) y el grado de obturación de la línea.

Para determinar el valor de las resistencias eléctricas de los depósitos superiores se sigue el siguiente procedimiento:

- Se alimenta con un caudal de agua constante dejando que alcance un nivel de equilibrio en el que el caudal de entrada es igual al de salida. Se registra el valor del nivel de líquido y de caudal.
- Se enciende la resistencia calefactora y se registra la evolución de la temperatura con respecto al tiempo (Figura 5).



**Figura 5. Temperatura a lo largo del tiempo en el ensayo realizado en T2 y T3**

- Dado que el modelo matemático de la evolución de la temperatura es el siguiente:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{W}{m}(T_i - T(t)) + \frac{0.24}{m \cdot Ce} \frac{V^2(t)}{R} - \frac{U}{m \cdot Ce}(T(t) - T_{ext})$$

Siendo  $T_i$  la temperatura de entrada de líquido,  $W$  el caudal de entrada y  $m$  la masa de líquido en el depósito (todos constantes) y  $V(t)$  el voltaje suministrado a la resistencia eléctrica.  $U$  es el coeficiente de pérdidas, que en este experimento se podrá considerar despreciable y  $C_e$  el calor específico del agua.

- A partir del estado estacionario de los datos registrados se puede determinar el valor de las dos resistencias eléctricas.
- Por otro lado, suponiendo  $U=0$ , el modelo matemático que relaciona la potencia eléctrica ( $P(t) = \frac{V^2(t)}{R}$ ) con la temperatura en el dominio

de Laplace es:

$$\Delta T(s) = \frac{0.24}{W \cdot Ce} \frac{\Delta P(s)}{1 + \frac{m}{W}s}$$

Cuantitativa, y cualitativamente, los resultados de los experimentos se ajustan bien al modelo de primer orden obtenido, lo cual indica que el modelo matemático inicialmente elegido es adecuado (con la consideración de que  $U$  es despreciable frente a la potencia eléctrica generada por la resistencia).

Para determinar el valor de los coeficientes de pérdidas con el entorno se sigue el siguiente procedimiento, similar al mostrado anteriormente:

- Se calienta líquido en los dos depósitos superiores y cuando se ha alcanzado una determinada temperatura se trasvasa al depósito T4 (así se elimina el efecto de que cuando se apaga una resistencia está no se apaga de forma instantánea). Se registra el valor del nivel de líquido total en dicho depósito.
- Se registra, a lo largo del tiempo, la temperatura del líquido en dicho depósito hasta que alcanza el equilibrio con el ambiente (Figura 6).
- Ahora, en un depósito sin resistencia eléctrica y sin flujos de entrada y salida de líquido, el modelo matemático de la evolución de la temperatura es el siguiente:

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{U}{m \cdot C_e} (T(t) - T_{ext})$$

Siendo  $U$  el coeficiente de pérdidas ( $U = K \cdot S$ ) y  $S$  la superficie de contacto de líquido con el exterior (que es función de la altura de líquido en el tanque).

La solución del modelo matemático es:

$$T(t) = T_{ext} + (T(t=0) - T_{ext}) \cdot e^{-\frac{U}{m \cdot C_e} t}$$

A partir de los datos registrados se puede determinar el valor de  $K$ , que como todos los depósitos son del mismo material se considerará igual para todos.

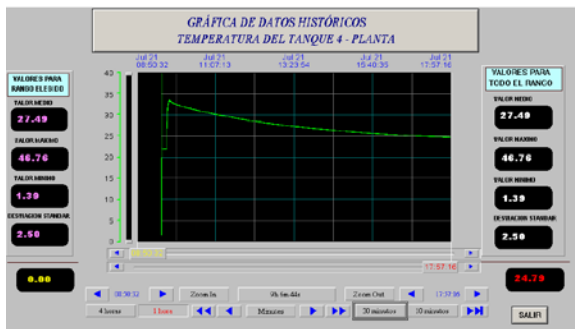


Figura 6. Gráfica del SCADA que muestra la evolución de la temperatura en T4

## 2.2 VALIDACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

Para la validación de la simulación dinámica del modelo programado en EcosimPro se dispone de una exhaustiva base de datos de experimentos realizados en la planta piloto [9]. Se realizaron dos tipos de validaciones:

- Estática: comparando numéricamente los valores en estacionario de la simulación con los obtenidos de la base de datos del SCADA.
- Dinámica: comparando cualitativamente, y sobre la misma gráfica algunos de los experimentos de la base de datos con los valores obtenidos en la simulación.

Como ejemplo de validación dinámica se muestra el caso en el que, partiendo de un estacionario, y en el que la configuración de la planta es la siguiente:

- R2: OFF; R3: ON
- P2: ON; P3: OFF; P4: 10 %

Se bloquea parcialmente la línea de flujo LF5, observándose lo siguiente:

- Severo descenso en el caudal de LF5 (Figura 7).

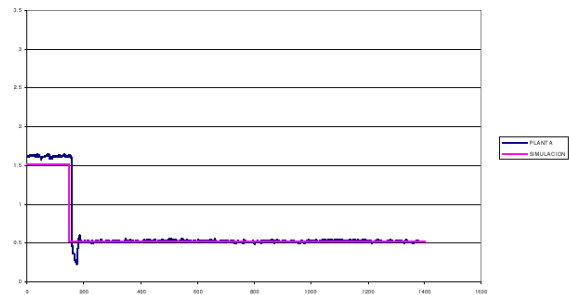


Figura 7

- El bloqueo de LF5 ocasiona menos aporte de líquido al depósito T4, con lo cual el caudal de salida por dicho depósito también desciende (Figura 8). Este descenso ocasiona también una disminución de la señal del PI que regula la bomba P5 (Figura 9).

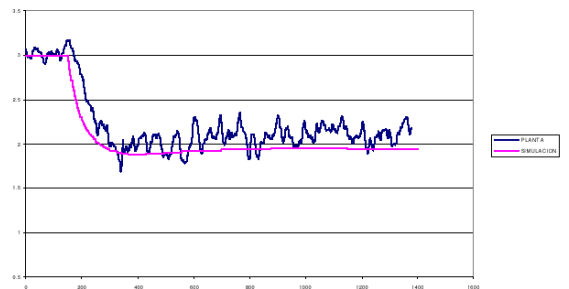


Figura 8



- El nivel del depósito T4 presenta un transitorio disminuyendo el nivel, pero recupera el valor de referencia del 50% en estado estacionario (Figura 10).

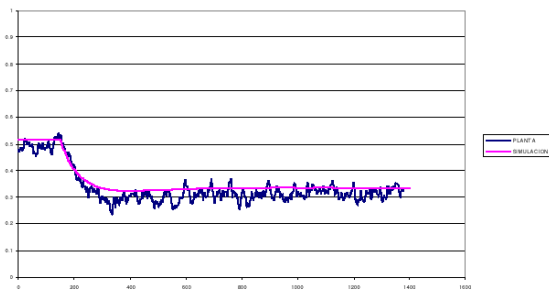


Figura 9

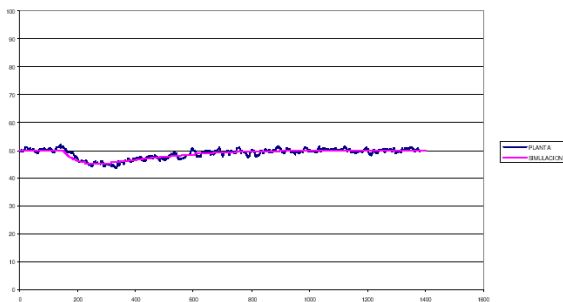


Figura 10

- El descenso del caudal de LF5 hace que el depósito T3 aporte menos agua caliente al depósito T4, esta acción sumada al caudal constante de caudal de la línea de flujo LF4 y a la temperatura constante del depósito T2 ocasionan la disminución de la temperatura del depósito T4 (Figura 11).

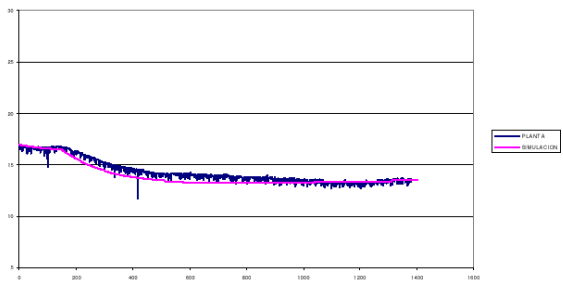


Figura 11

Como se observa en las gráficas, en este experimento el modelo matemático se ajusta bien a la realidad. Como se ha indicado anteriormente en [4] se ha realizado una validación más exhaustiva del modelo matemático y se puede concluir que el modelo desarrollado se ajusta perfectamente al comportamiento de la planta piloto.

### 3 SIMULADOR PREDICTIVO

En esta sección se va a describir brevemente la arquitectura de la aplicación que va a actuar como entorno de ayuda a la operación. En [11] se dispone de información adicional de dicho entorno, que resulta ser un módulo integrado dentro del SCADA de la planta piloto con las siguientes características:

- Determina el estado inicial para el simulador predictivo. En la subsección 3.1 se indica como se determina ese estado inicial.
- Permite especificar el experimento a realizar. En definitiva cuanto y cuando se van a modificar las condiciones de contorno y cuando se van a activar los fallos sobre la planta.
- Invoca la ejecución del simulador predictivo y la posterior presentación de resultados. Como ya se ha indicado este simulador predictivo contiene la planta piloto y su estructura de control, y además se ejecuta en tiempo acelerado.

El simulador predictivo es el modelo de simulación descrito en la sección 2 al que se le ha dotado de capacidades de servidor OPC para que se comunique con el sistema SCADA a través de OPCLINK. En la subsección 3.2 se describe como se genera un servidor OPC a partir del modelo de simulación.

Este simulador predictivo se ejecuta en tiempo escalado, siendo el factor de aceleración función de la longitud temporal del experimento a desarrollar. De modo que su ejecución se interrumpe con una determinada periodicidad enviándosele las acciones sobre el modelo cuando corresponda. Al finalizar la simulación se utiliza el fichero de informe, que si se desea genera EcosimPro, para mostrar gráficamente los resultados de la simulación.

Adicionalmente, se ha generado otro simulador con capacidad de servidor OPC para reemplazar la planta piloto por una simulación de la misma. Esta simulación sólo contiene a la planta piloto no su estructura de control, y se ejecuta en tiempo real.

Así, la arquitectura del simulador predictivo y del sistema SCADA queda reflejado en la Figura 12 .

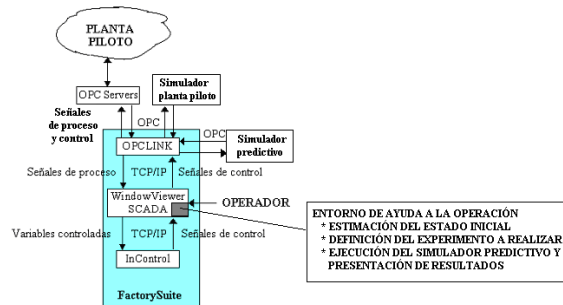


Figura 12

### 3.1 DETERMINACIÓN DEL ESTADO INICIAL

El estado inicial del modelo de simulación viene dado por:

- El valor inicial de todas aquellas variables de estado del sistema
- Para cada regulador, el valor inicial de la señal de control y de la señal de referencia y el estado del mismo (manual o automático).
- Las variables de configuración de la planta (resistencias y bombas manuales activas o no).

Determinar el valor de las variables asociadas a los reguladores no es un problema mayor, simplemente hay que acceder a las correspondientes variables del SCADA.

Con respecto a las variables de configuración de la planta sucede lo mismo, ya que aunque no se puedan activar directamente desde el SCADA (hay que actuar directamente en la planta), en el SCADA si que existen variables que registran la configuración de la planta.

Con respecto al valor inicial de las variables de estado del modelo. Indicar que son variables de estado el valor inicial de la masa y temperatura del líquido en cada depósito.

Determinar la masa en los depósitos T1 y T4 no es problema ya que se dispone del nivel del líquido en ambos depósitos. Para los depósitos T2 y T3 no se mide el nivel, pero si el caudal de salida. Caudales que, si las líneas de flujo no están obturadas nos permite calcular una buena estimación de la masa en los depósitos T2 y T3.

Determinar la temperatura del agua en T2, T3 y T4 no es problema ya que se mide directamente. Sin embargo no se mide la temperatura de T1. Para estimarla se utiliza un simulador dinámico que genera una estimación del valor de la temperatura del líquido en T1 a partir de:

- Una estimación del valor inicial suministrada por el usuario y basada en medidas de la temperatura en los otros depósitos.
- Una estimación de la temperatura del líquido de entrada (suministrada por el usuario) y del caudal de entrada (LF1), que se mide.
- Los valores de las temperaturas del líquido en T2 y T3 (que se miden) y de los caudales de recirculación (LF4 y LF5), que se estiman en función del estado de las bombas P3 y P4.
- El valor del nivel de líquido en T1, que se mide.

### 3.2 GENERACIÓN DE LOS SIMULADORES CON CAPACIDAD DE SERVIDOR OPC

Se ha utilizado una aplicación informática, desarrollada en el Centro de Tecnología Azucarera de la Universidad de Valladolid [1] y [2], denominada CreaOPC (Figura 13), que a partir de un modelo de simulación en forma de clase VC++ desarrollado con EcosimPro genera una aplicación cuya ejecución sea la simulación del proceso en tiempo real (o acelerado) y con capacidad para comunicarse con otras aplicaciones a través del interfaz OPC. Realmente el ejecutable generado es una aplicación que actúa como servidor OPC y por tanto puede comunicarse con clientes OPC (Figura 14).

Los servidores OPC generados tienen capacidad de ejecución en tiempo real, escalado o tan rápido como sea posible y, aprovechando las capacidades de EcosimPro pueden leer un estado inicial y cargarlo en la simulación antes de su inicio. Como ya se ha indicado ambas son características necesarias del simulador predictivo.

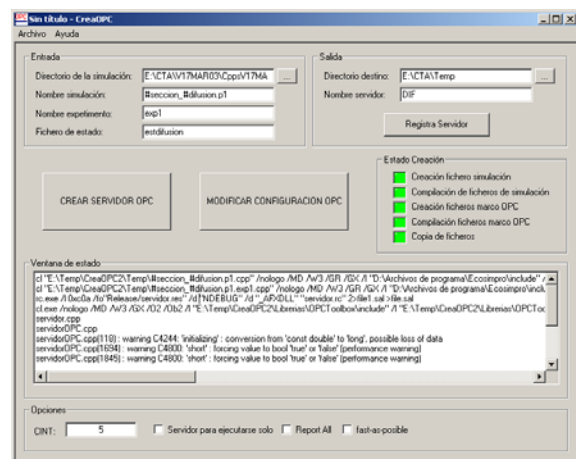


Figura 13

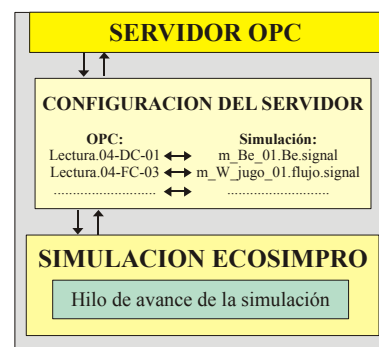


Figura 14

#### 4 CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un sistema software basado en simulación predictiva que sirve como herramienta de soporte para la actuación en una planta piloto termohidráulica.

En este trabajo ha sido necesario modelar dinámicamente el sistema objeto de estudio, observándose que EcosimPro es una buena herramienta de modelado. Con respecto a la identificación de los parámetros del sistema se ha realizado considerando partes individuales del modelo matemático y haciendo experimentos particulares. También podría usarse, y puede indicarse como trabajo futuro, una identificación de tipo global basada en técnicas de optimización numérica.

Con respecto a las comunicaciones se observa que el hecho de usar OPC ha sido un acierto, ya que el SCADA implementa ese tipo de comunicación y además nos permite utilizar la simulación con otras aplicaciones que soporten OPC. Usar la herramienta CreaOPC facilita mucho el trabajo de generar servidores OPC a partir de simulaciones EcosimPro.

Con respecto al simulador predictivo decir que la herramienta funciona correctamente y permite predecir el comportamiento de la planta a partir de un determinado estado. La estimación del estado inicial es buena, aunque como trabajo futuro pueden indagarse otro tipo de técnicas para estimar el estado inicial.

#### Agradecimientos

Los autores quieren agradecer el soporte financiero de la Junta de Castilla y León por medio del proyecto “*Desarrollo de un entorno de modelado inteligente y simulación distribuida de plantas de proceso*”.

#### Referencias

- [1] Acebes, L.F., Alves, R, Merino A., Prada C. *Un Entorno de Modelado Inteligente y Simulación Distribuida de Plantas de Proceso*. Actas de las XXIV Jornadas de Automática. 2003.
- [2] Alves R. “Simulación distribuida de procesos”. Tesis Doctoral. Universidad de Valladolid. 2005.
- [3] Campos T, de la Iglesia J. “Construcción, instrumentación y control de una planta piloto termohidráulica”. Proyecto fin de Carrera. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad de Valladolid. 2001.

[4] Castrillejo D. “Parametrización y validación de un modelo de simulación dinámica de una planta piloto de proceso continuo”. Proyecto fin de Carrera. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad de Valladolid. 2004.

[5] EcosimPro by EA Internacional, Dynamic Modeling & Simulation Tool.  
<http://www.ecosimpro.com>

[6] Fernández F., Gómez J.C. “Diseño e implementación de comunicaciones entre un sistema SCADA desarrollado con INTOUCH y un sistema experto implementado en G2”. Proyecto fin de Carrera. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad de Valladolid. 2002.

[7] Gómez R. & Sánchez R. “Diseño de un SCADA para una Planta Piloto usando un simulador OPC”. Proyecto fin de Carrera.. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad de Valladolid. 2000.

[8] Iserman R.. Practical aspects of process identification, *Automatica*, 16, p.575-587, 1980

[9] Ljung L. and Glad T. Modelling of dynamic system, Prentice Hall, 1994.

[10] Modelica, a unified object-oriented language for physical system modelling.  
<http://www.Dynasim.se/Modelica>.

[11] Oliveira F. “Simulación predictiva de una planta piloto como herramienta de soporte a la operación”. Proyecto fin de Carrera. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad de Valladolid. 2005.

[12] OPC Foundation.  
<http://www.opcfoundation.org>.

[13] San José J.M. “Realización de experimentos sobre una planta piloto para obtener una base de datos para la aplicación de técnicas de diagnóstico”. Proyecto fin de Carrera. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad de Valladolid. 2004.

[14] Zhu Y., Backx T. Identification of multivariable industrial processes for simulation, diagnosis and control, Springer-Verlag, 1993.