

## MAQUETA INDUSTRIAL PARA DOCENCIA E INVESTIGACIÓN

**M. Domínguez, J.J. Fuertes, P. Reguera, J. J. González, J.M. Ramón**

*Instituto de Automática y Fabricación. Área: Automática y Control.  
Escuela de Ingenierías Industrial e Informática,  
Campus Universitario de Vegazana, Universidad de León.  
24071 León, España. Tfno: +34-987-291694.  
e-mail: diemdg@unileon.es; http://aaciaf.unileon.es*

Resumen: El Área de Automática y Control del Instituto de Automática y Fabricación de la Universidad de León viene desarrollando maquetas industriales de procesos para fines didácticos y de investigación. Esta actividad comenzó en el año 1995 con el diseño y la puesta en servicio de la planta piloto del Instituto. La finalidad de este tipo de instalaciones es doble: de una parte, acercar a los alumnos a la realidad industrial mediante el manejo de equipos y sistemas involucrados en un proceso industrial; de otra, incorporarlas, mediante su conexión a Internet, a un Laboratorio Remoto y Distribuido, que permita su utilización de forma deslocalizada, favoreciendo un aprendizaje mucho más activo y abriendo nuevas expectativas a la formación. *Copyright © 2003 CEA-IFAC*

Palabras Clave: Lazos de control, maqueta industrial, PLC, DCS, instrumentación inteligente HART, supervisión remota, Internet, laboratorio remoto, *e-learning*.

### 1. INTRODUCCIÓN

La enseñanza de disciplinas de carácter tecnológico, especialmente en los estudios de Ingeniería Industrial, une, a su consabido grado de dificultad, la necesidad de estudiar equipos e instalaciones industriales complejas. Es necesario utilizar para ello equipamientos muy costosos que, en muchas ocasiones, no están disponibles.

Tradicionalmente, se ha recurrido al uso de equipos reducidos, a pequeña escala, que dan una aproximación a la realidad. Con el desarrollo y abaratamiento de los sistemas informáticos, se ha abierto un camino muy importante para la docencia mediante la utilización de programas informáticos que permiten la simulación de circuitos y sistemas. Estos simuladores facilitan mucho la labor, ya que, con un coste más reducido, se puede disponer de un mayor número de puestos de laboratorio para los alumnos, pero no dan una idea de realidad completa cuando se trata de manejar tecnologías industriales a las que se enfrentarán el día de mañana. Con la aparición de los sistemas multimedia, los programas

de simulación han evolucionado considerablemente, mejorando los entornos gráficos, incorporando imágenes y sonidos y tendiendo hacia la denominada realidad virtual.

La expansión del mundo de las comunicaciones y de las Tecnologías de la Información ha puesto al servicio de todas las personas la posibilidad de recurrir al uso de INTERNET para su utilización como una herramienta en la que se tiene una gran cantidad de información de forma muy fácil y cómoda, pero con pocas posibilidades, por el momento, de interactuar sobre equipos industriales, maquinas, instalaciones, etc.(Antsaklis, *et al.*,1999; Schmid, 2001; Ramos, *et al.*,2001).

El proyecto que aquí se presenta ha partido de la necesidad de facilitar el acceso a las personas (profesores, alumnos, trabajadores, profesionales, etc.) de la forma mas fácil y flexible, sin restricciones de horarios, a instalaciones reales, complejas, costosas y en las que se pueda “interactuar sobre ellas de forma real y no simulada”.

## 2. OBJETIVOS

Los objetivos de este trabajo se centran en dos aspectos generales: por una parte el diseño y desarrollo de una maqueta que permita realizar procesos industriales manejando independientemente o de forma conjunta 4 variables: presión, temperatura, caudal y nivel; por otra parte, facilitar su operación, manejo y supervisión de forma remota mediante el uso de Internet.

Las especificaciones iniciales del diseño de la maqueta se han establecido en base a los siguientes objetivos:

- Portabilidad: las maquetas son autónomas y están montadas sobre un bastidor de acero inoxidable dotado con ruedas. Todos los accionamientos son eléctricos y únicamente se necesita una toma de agua de proceso y un desagüe.
- Flexibilidad en el sistema de control: el cuadro eléctrico de la maqueta está diseñado de tal forma que todas las señales eléctricas asociadas a las variables manejadas están disponibles en 3 conectores tipo Canon de 25 pines de manera que, a través de ellos, la maqueta puede ser controlada por un PLC, por un DCS o por tarjetas de adquisición de datos y PC.
- Acceso remoto: el control mediante DCS incluye un *Web server* que permite la realización de experiencias remotas desde Internet. Cuando el control se realiza mediante un PLC, se requiere de la utilización de unidades de periferia descentralizada basadas en PROFIBUS-DP maestro-esclavo, disponiendo el maestro de una tarjeta de red Ethernet que permite la integración del sistema en Internet utilizando el protocolo TCP-IP. Con el fin de garantizar una operación remota segura, se ha dotado a la maqueta de los enclavamientos cableados necesarios.
- Amplio espectro de operación: las maquetas se pueden configurar para desarrollar desde experiencias de control básico a experiencias de control avanzado multivariable debido a las interacciones que se pueden establecer entre los diferentes lazos de regulación. Si se acoplan al menos 2 maquetas de este tipo, se pueden realizar experiencias de procesos tipo *batch*.
- Carácter industrial: tanto los accionamientos como la instrumentación son todos ellos de tipo industrial, siendo esta última configurable y parametrizable mediante el protocolo HART.

En la Figura 1 se puede observar una foto de la maqueta diseñada.



Fig. 1. Foto de la maqueta industrial.

Entre los requisitos que se fijaron para llevar a buen puerto la conexión de la maqueta a Internet, cabe destacar:

- Realizar todo el diseño al mínimo coste posible, reutilizando todos los programas que sean necesarios y utilizando versiones *freeware* siempre que sea posible.
- Optimizar la disponibilidad y utilización del sistema físico garantizando un servicio de 24h diarias los 365 días del año para que la maqueta sea utilizada de forma eficiente.
- Permitir la comparación entre el sistema real y un modelo simulado del mismo.
- Supervisar el perfecto funcionamiento del sistema y también el trabajo realizado por los usuarios. Gestionar los datos generados y, en definitiva, proporcionar una aplicación a la que los usuarios puedan acceder no sólo para ejecutar experimentos, sino también para guardar históricos, leer tutoriales y documentación adicional, observando problemas resueltos y resolviendo problemas propuestos.
- Garantizar una velocidad de acceso alta y una completa deslocalización entre el sistema físico y el gestor de la aplicación.

## 3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

La maqueta industrial está constituida por un circuito principal de proceso y por dos circuitos de *utilities* asociados a la variable temperatura:

- Circuito de proceso: diseñado para el control de cuatro variables físicas en recirculación con flexibilidad para la interacción o independencia entre ellas. Básicamente está constituido por dos

depósitos en cascada de 5 y 6,5 litros de capacidad asociados a los lazos de control de nivel. La recirculación se realiza mediante un circuito de bombeo impulsado por una bomba centrífuga con accionamiento a velocidad variable. Incorpora la instrumentación necesaria para implementar los lazos de control de presión, caudal, nivel y temperatura del fluido de proceso.

- Circuito calentamiento: es el encargado de producir y almacenar agua caliente mediante resistencias eléctricas con accionamiento variable estático. La transferencia de calor al proceso se realiza mediante un intercambiador de placas de alto rendimiento que proporciona una gran transferencia térmica y una enorme reducción del espacio ocupado a igual potencia de intercambio frente a los tradicionales intercambiadores tubulares. Mediante una válvula de tres vías motorizada, en rango partido, se regula el caudal de agua caliente y por lo tanto la transferencia de calor al proceso.
- Circuito de enfriamiento de agua: proporciona la capacidad de reducir la temperatura del proceso utilizando agua de red como fuente. La transferencia de calor al proceso se realiza mediante un intercambiador de placas de similares características al de agua caliente, estando la regulación encomendada a una válvula de dos vías motorizada.

Estos 3 circuitos están montados sobre un panel de acero inoxidable de 150x170 cm en el que en su parte posterior se sitúa el armario eléctrico.

El esquema funcional del proceso está representado en la Figura 2.

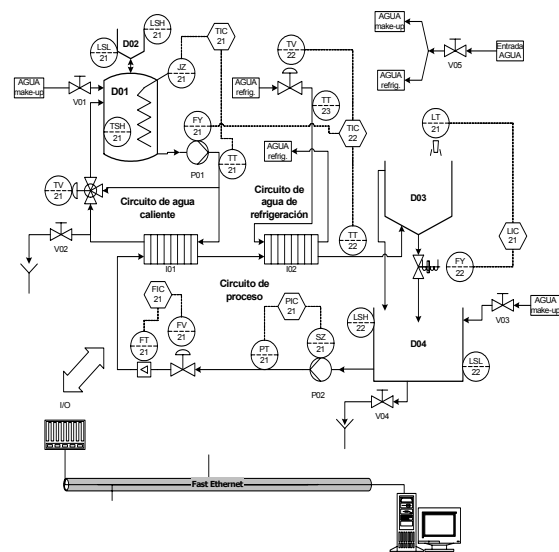


Fig. 2. Diagrama funcional del proceso.

De la misma forma, en la Figura 3, se representa el esquema constructivo y la instrumentación asociada.

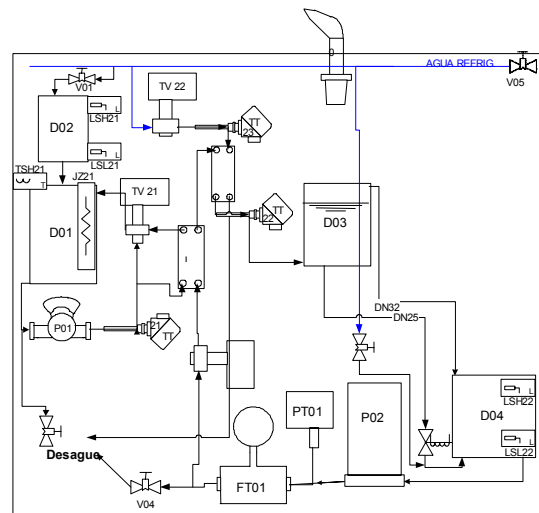


Fig. 3. Esquema constructivo e instrumentación.

En función de la instrumentación que lleva incorporada la maqueta, las variables que se pueden manejar son las indicadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Variables de la maqueta industrial

TAG	DESCRIPCION	TIPO	SEÑAL	RANGO
TT21	TRANSMISOR DE Tª AGUA CALIENTE	A	4-20 mA	0-100°C
TT22	TRANSMISOR TEMPERATURA PROCESO	A	4-20 mA	0-100°C
TT23	TRANSMISOR Tª AGUA FRIA	A	4-20 mA	0-100°C
LT01	TRANSMISOR NIVEL DEPÓSITO D03	A	4-20 mA	0-100%
FT01	TRANSMISOR DE CAUDAL DE PROCESO	A	4-20 mA	0-1500l/h
PT01	TRANSMISOR DE PRESIÓN DE PROCESO	A	4-20 mA	0-1barg
JZ21	CONTROLADOR DE POTENCIA	A	4-20 mA	0-100%
TV22	VÁLVULA TEMPERATURA AGUA FRIA	A	4-20 mA	0-100%
FV21	VÁLVULA CAUDAL DE PROCESO	A	4-20 mA	0-100%
SZ01	CONVERTIDOR BOMBA PROCESO	A	4-20 mA	0-100%
TV21	VÁLVULA DE 3 VÍAS AGUA CALIENTE	A	4-20 mA	0-100%
LSH21	INTERRUPTOR NIVEL ALTO DEPÓSITO D02	D	10 V	
LSL21	INTERRUPTOR NIVEL BAJO DEPÓSITO D02	D	10 V	
LSH22	INTERRUPTOR NIVEL ALTO DEPÓSITO D04	D	10 V	
LSL22	INTERRUPTOR NIVEL BAJO DEPÓSITO D04	D	10 V	
TSH22	INTERRUPTOR DE TEMPERATURA	D	10 V	
P02	BOMBA CENTRÍFUGA DE PROCESO	D	10 V	
P01	BOMBA AGUA CALIENTE	D	10 V	
FY22	ELECTROVÁLVULA	D	10 V	

Además de estas variables, se incorporan otras que son consecuencia de ellas y que se refieren a las acciones que se toman y sus confirmaciones, siendo necesarias para garantizar el perfecto funcionamiento de los actuadores. Su relación se detalla en la Tabla 2.

Tabla 2. Variables adicionales en la maqueta industrial, acciones y confirmaciones

TAG	DESCRIPCION	TIPO	SEÑAL	E/S
ES01	ALTA TEMPERATURA AGUA CALIENTE	D	10 V	E
ES02	FALLO BOMBA P01	D	10 V	E
ES03	FALLO VARIADOR BOMBA P02	D	10 V	E
ES04	FALLO RESISTENCIAS	D	10 V	E
ES05	CONFIRMACION MARCHA BOMBA P01	D	10 V	E
ES06	CONFIRMACION MARCHA BOMBA P02	D	10 V	E
ES07	CONFIRMACION MARCHA RESISTENCIAS	D	10 V	E

Para designar y representar los diferentes elementos de que consta la planta, se han adoptado las normas de la Sociedad Americana de Instrumentación (ISA), concretamente la Norma ISA-S5.1-84, que es prácticamente un estándar de facto en las industrias y que además facilita la asignación de códigos y la simbología para los accionamientos, instrumentos de medida y control, y sistemas auxiliares. Con esta norma, se obtiene una etiqueta identificadora denominada TAG, que consta de dos partes: la primera formada por letras, en mayúsculas y hasta un número de 4, que identifica la funcionalidad; la segunda, formada por números que identifican el sistema, circuito o bucle donde se ubica el elemento.

Para la representación de las variables de la planta, se ha seguido la codificación indicada en la Tabla 3.

Tabla 3. Codificación de las variables según norma Norma ISA-S5.1-84

PRIMERA LETRA VARIABLE MEDIDA	LETRAS SUCESIVAS	
	FUNCIÓN DE LECTURA	FUNCIÓN DE SALIDA
F = CAUDAL	E = ELEMENTO PRIMARIO	C = CONTROL
L = NIVEL		T = TRANSMISOR
T = TEMPERATURA		V = VÁLVULA
P = PRESIÓN		

#### 4. FUNCIONALIDAD. LAZOS DE CONTROL

Los lazos de control disponibles para la realización de experiencias son los siguientes:

Lazo de control de presión. Medida: transmisor de presión inteligente 4-20mA + HART. Salida: accionamiento a convertidor de frecuencia vectorial sobre bomba centrífuga. Algoritmo de regulación básico PID. Se establecen tres modos de operación: manual, auto y remoto. La unidad de la variable indicada/registrada es barg. Ver Figura 4.

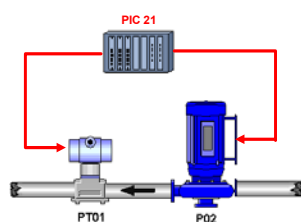


Fig. 4. Lazo de control de presión.

Lazo de control de caudal. Medida: transmisor de caudal electromagnético inteligente 4-20mA + HART. Salida: válvula de control eléctrica 2 vías con posicionador. Algoritmo de regulación básico PID. Se establecen tres modos de operación: manual, auto y remoto. La unidad de la variable indicada/registrada es l/h. Ver Figura 5.

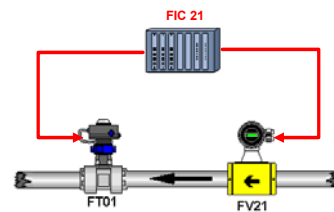


Fig. 5. Lazo de control de caudal.

Lazo de control de nivel. Medida: transmisor de nivel ultrasónico inteligente 4-20mA + HART. Salida: electroválvula 2 vías. Algoritmo de regulación básico PID. Se establecen tres modos de operación: manual, auto y remoto. La unidad de la variable indicada/registrada es %. Ver Figura 6.

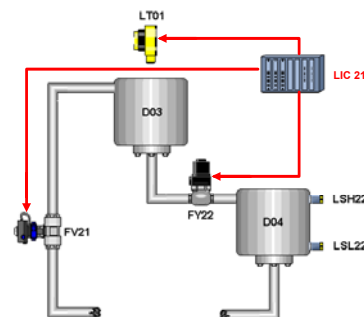


Fig. 6. Lazo de control de nivel.

Lazo de control de temperatura de proceso. Medida: transmisor de temperatura inteligente 4-20mA + HART sobre sonda PT-100. Salida: en rango partido sobre dos válvulas de control eléctricas de 2/3 vías con posicionador. Algoritmo de regulación básico PID. Se establecen tres modos de operación: manual, auto y remoto. La unidad de la variable indicada/registrada es °C. Ver Figura 7.

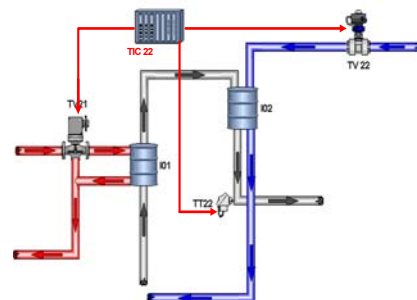


Fig. 7. Lazo de control de temperatura.

Lazo de control de temperatura de agua caliente. Medida: transmisor de temperatura inteligente. 4-20mA + HART sobre sonda PT-100. Salida: accionamiento variable estático sobre resistencia calefactora. Algoritmo de regulación básico PID. Se establecen tres modos de operación: manual, auto y remoto. La unidad de la variable indicada/registrada es °C. Ver Figura 8.

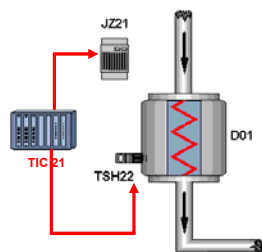


Fig. 8. Lazo de control temperatura de calentamiento.

## 5. CONEXIÓN REMOTA

La conexión remota de la maqueta vía Internet, como ya se indicó, constituye una opción cada vez más interesante desde el punto de vista de ofertar una formación mucho más activa y participativa. Además, facilita la integración de equipos dispersos en lo que denominamos Laboratorios Remotos.

Ahora bien, para su realización, es necesario disponer de una plataforma tecnológica flexible, abierta, dinámica y no propietaria que proporcione un acceso a la maqueta ágil y sencillo, sin necesidad de utilizar programas específicos o propietarios que, en muchas ocasiones, no son acordes con la dimensión del problema. Además deberá evolucionar fácilmente con la previsible expansión en los próximos años de las tecnologías emergentes de Internet.

En nuestro caso, la plataforma definida consiste en una estructura de triple capa, con una capa servidor donde reside el sistema físico, una capa intermedia constituida por una base de datos (*SQL Server*) (Codd, 1970) y una capa cliente que es la encargada de facilitar el *interface* hombre-máquina para el acceso de los usuarios remotos. (Domínguez, *et al.*, 2001; Domínguez, *et al.*, 2002). En la Figura 9 se puede observar esta estructura.

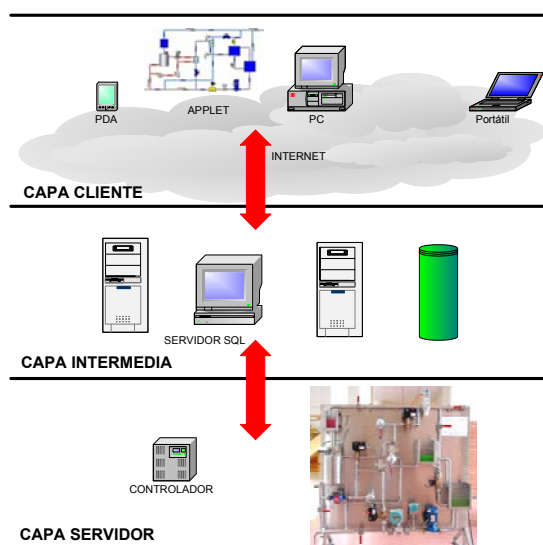


Fig. 9. Estructura de triple capa.

Para acceder al sistema físico dentro de la capa servidor, se utiliza un controlador Opto22 de la familia Mystic, modular y escalable. El fabricante del

sistema suministra información exhaustiva del *hardware* y del *kernel* del controlador, facilitando así el desarrollo de herramientas que posibilitan su integración con otros sistemas. El intercambio de información, bidireccional, entre esta capa y la capa intermedia se realiza mediante el denominado servicio de enlace. Una primera opción en cuanto a la implementación de este servicio es utilizar XML como origen de datos del proceso real. La principal ventaja que XML ofrece es que se pueden portar los datos a cualquier otra aplicación de una forma bastante sencilla, siendo un estándar cada vez más utilizado. Así, se pueden leer datos formateados en XML desde Excel, Access, Java, etc. (Meléndez, *et al.*, 2001).

Una segunda opción consiste en desarrollar una herramienta específica más abierta, flexible y configurable que permite mayores prestaciones a cambio de un mayor tiempo de desarrollo. Esta herramienta accede tanto a la tablas de memoria del controlador como a las tablas de lectura/escritura de la base de datos, realizándose este intercambio de información mediante una conexión ODBC.

La capa intermedia, además de la base de datos, requiere de un gestor de bases de datos, de un servidor *Web* y, al igual que antes, de un servicio de enlace con la capa cliente para la transferencia de información hacia y desde los usuarios remotos. En el sistema gestor de la base de datos se fija una política adecuada de gestión de usuarios. El usuario que accede lo hace mediante un identificador y una contraseña que le facilita el acceso, en función de sus privilegios, a las diferentes áreas de trabajo asignadas. Utilizando SSL se garantiza la necesaria seguridad. El servidor *Web* se utiliza para albergar dos sitios *Web*: uno para habilitar el acceso de los usuarios al sistema físico, simulaciones y datos históricos del experimento y otro orientado a la administración vía *Web*.

Respecto de la capa cliente, está constituida por los sinópticos a través de los cuales los usuarios acceden al sistema, interactúan con él y visualizan los resultados. De las diferentes opciones existentes, se escogió la basada en *applets* de JAVA por la fiabilidad de su código, robustez, facilidad de desarrollo y actualización. Además JAVA nos aporta independencia en cuanto a la plataforma utilizada. En la Figura 10 se puede observar el *applet* correspondiente a uno de estos sinópticos.

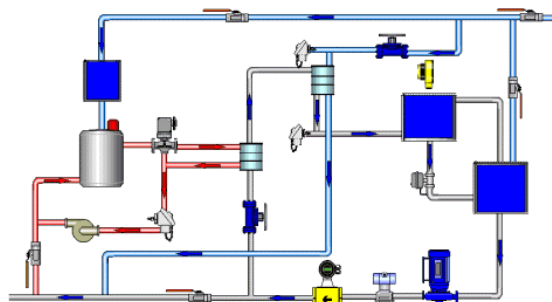


Fig. 10. Cliente. *Applet* de un sinóptico de la maqueta.

La transferencia de información entre las capas intermedia y cliente se realiza mediante otro servicio de enlace. Éste utiliza una arquitectura *applet-servlet* para los clientes interactivos y JSP y ASP para la generación dinámica de páginas *Web* (en respuesta a las consultas planteadas por los usuarios al sistema gestor de base de datos).

En cuanto a las herramientas *software* utilizadas en el diseño de la plataforma tecnológica, se ha perseguido el mínimo coste posible, por lo que se han utilizado versiones de productos *freeware* o de productos comerciales de amplia difusión, Windows Server, IIS, ASP, motor de ejecución de *servlets*, JDK.

Respecto del *interface* de usuario remoto, se han desarrollado aplicaciones ligeras (páginas inferiores a 70k) y fácilmente reutilizables para otros sistemas físicos, evitando el uso de flash o tecnologías similares.

## 6. CONCLUSIONES

En este trabajo, se ha presentado el diseño, desarrollo e implementación de una maqueta industrial de control de procesos que ha sido realizado por el AAC (Área de Automática y Control) del I.A.F. (Instituto de Automática y Fabricación) de la Universidad de León para facilitar a los alumnos un estudio de la Automática más próximo a los procesos industriales reales.

En la construcción de la maqueta, se han utilizado materiales, instrumentos y equipos industriales que garantizan tanto la robustez y la durabilidad a lo largo del tiempo, como la escalabilidad real en la investigación y la docencia.

La posibilidad del acceso remoto a un sistema físico permite racionalizar el uso del mismo evitando colas innecesarias, amplía razonablemente el número de horas dedicadas a la experimentación y, además, facilita la compartición de recursos entre distintos centros.

Utilizar una arquitectura cliente/servidor de tres capas facilita el intercambio en cuanto a la tecnología de manejo del sistema físico. A través del entorno *Web* el usuario remoto puede descargar en el controlador aquellas estrategias de control que desee experimentar y elegir en qué lazos de control las va a aplicar, supervisando *on-line* la evolución que provocan las mismas.

Además de lo ya citado, indicar que con este tipo de estructuras lo que se pretende es abrir un camino para el desarrollo de una red de laboratorios remotos, creando una infraestructura flexible, en la que se puedan incorporar (conectar) a través de Internet equipos industriales que no tienen porqué estar físicamente ubicados en el mismo lugar, ni incluso en la propia red local y abriendo la posibilidad a la incorporación de equipos reales que estén operando en las industrias. Estamos pues, llevando la flexibilidad del uso de Internet a su más amplia

expresión, poniendo a disposición de los usuarios autorizados lo que denominamos: "LABORATORIO REMOTO y DISTRIBUIDO VÍA INTERNET", aplicado a la enseñanza de la Automática pero que también puede ser aplicado a otras muchas disciplinas, permitiéndonos así introducir la enseñanza en el concepto de Sociedad de la Información.

## REFERENCIAS

- Antsaklis, P., Basar, T., De Carlo, R. (1999). IEEE Control Systems Magazine. *Report on the NSF/CSS Workshop on New Directions in Control Engineering Education*. N° 19.
- Codd, E.F. (1970). *A relational model of data for large shared data bank*. IBM Research Lab. ACM Press. New York.
- Domínguez, M., Marcos, D., Reguera, P., González, J.J., Blázquez, L.F. (2001). *Connection Pilot Plant to the Internet*. IFAC Internet Based Control Education. IBCE01, Madrid. España.
- Domínguez, M., Alonso A., Reguera, P., González, J.J., Fuertes J.J. (2002). *Optimización de tiempos en el acceso remoto vía Internet a planta piloto para prácticas*. EIWISA'02. Alicante.
- Meléndez, J., Colomer, J., Rosa de la, J. Fabregat, R., Macaya, D. (2001). *Experiencias en teleoperación de procesos y telenseñanza en la Universitat de Girona*. EIWISA'01. Madrid.
- Ramos, C., Herrero, J., Martínez, M., Blasco, X. (2001). *Internet en el desarrollo de prácticas no presenciales con procesos industriales*. EIWISA'01. Madrid.
- Schmid, C. (2001). *A remote laboratory experimentation network*. EIWISA'01. Madrid.