

DESARROLLO DE UN LABORATORIO VIRTUAL PARA EL CONTROL AVANZADO DE PROCESOS

A. NEVADO, R. REQUENA Y J. M. MARTÍN-SÁNCHEZ

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Control. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Nacional de Educación a Distancia.

anevado@ieec.uned.es rrequena@ieec.uned.es juanms@ieec.uned.es

Este artículo presenta el desarrollo de un laboratorio virtual para la aplicación de control avanzado. El laboratorio ha sido diseñado con fines educativos y de investigación, proporcionando un medio de acceso a controladores adaptativos predictivos expertos que se ejecutan en un servidor de Internet desde computadores remotos conectados a dicha red. Asimismo, se han desarrollado algunos ejemplos de aplicaciones de usuario basadas en esta arquitectura, las cuales están disponibles en el servidor para su descarga. El diseño presentado permite el desarrollo de aplicaciones por parte del usuario y puede extenderse fácilmente para manejar otros tipos de controlador.

Palabras clave: Control avanzado, control adaptativo, control predictivo, laboratorio.

1. Introducción

La plataforma software descrita en este artículo se ha desarrollado con fines educativos y de investigación, con el fin de proporcionar al estudiante o investigador en control avanzado el acceso a la experimentación con controladores adaptativos predictivos expertos ADEX [1]. Dichos controladores, protegidos mediante una licencia hardware, han sido donados por la empresa *Adaptive Predictive Expert Control, S.L.* al Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Control de la ETSI Industriales de la UNED. El laboratorio se compone de un programa servidor equipado con la licencia hardware en el que se ejecutan los controladores, así como de una librería que proporciona la funcionalidad de acceso remoto hacia dicho servidor. La librería reenvía, hacia el servidor, las llamadas a controlador realizadas en los clientes a través de Internet, devolviendo a continuación los resultados de la ejecución del controlador al usuario.

A continuación, la Sección 2 de este documento describe la metodología de control adaptativo predictivo experto. La Sección 3 muestra la arquitectura software del laboratorio desarrollado, junto con algunos casos posibles de uso del mismo. La Sección 4 describe el proceso de desarrollo de aplicaciones basadas en el laboratorio virtual. La Sección 5 muestra un ejemplo de aplicación en la enseñanza implementado sobre la estructura del software desarrollado. Finalmente, la Sección 6 recoge las conclusiones del trabajo realizado.

2. Control adaptativo predictivo experto

El control adaptativo predictivo experto ADEX es una nueva generación de control adaptativo predictivo (AP) [2-4], que combina esta metodología con la del control experto, definiendo dominios de operación para ambas en una estructura de control integrada. La evolución de las variables de entrada/salida (E/S) del proceso determina si se aplica a éste control AP o control experto, dependiendo del correspondiente dominio de operación. Conviene resaltar que un controlador ADEX puede manejar hasta un máximo de tres variables de proceso, que se relacionan con tres entradas al mismo. Asimismo,

dichos controladores consideran los efectos que determinadas variables tienen sobre las de proceso, denominándose las primeras, perturbaciones.

El control adaptativo predictivo experto ha sido aplicado con éxito en diferentes procesos industriales [5-9], por lo que el aprendizaje por parte del estudiante de esta metodología de control le aportará, sin duda, una gran ventaja en su vida profesional.

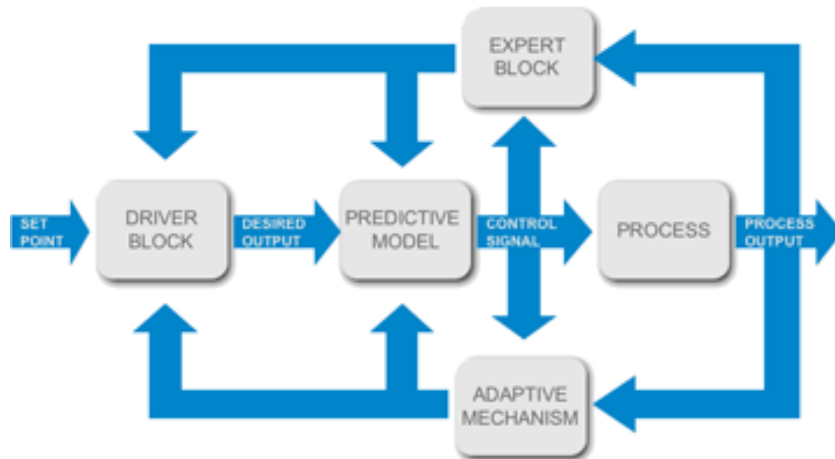


Figura 1. Configuración general de un controlador ADEX

La configuración general de un controlador ADEX se presenta en la Fig. 1 y la operación, en cada instante de control de los diferentes bloques mostrados en la misma se describe en los siguientes párrafos.

2.1. El bloque experto

El Bloque Experto determina si se aplica al proceso control AP o control experto. Cuando se aplica control experto, este bloque determina que el bloque de control se comporte como un sistema experto, el cual genera la acción de control según reglas que imitan el comportamiento del operador humano. Cuando se aplica control AP, el bloque experto interactúa con los otros bloques de ADEX como se describe en los siguientes párrafos.

2.2. El bloque conductor

El bloque conductor genera, para cada variable de salida del proceso, una trayectoria deseada con el fin de conducir la salida del proceso hacia la consigna, respondiendo a un criterio de rendimiento deseado. El bloque experto tiene la capacidad de modificar este criterio de rendimiento, para acomodar la actuación deseada de ADEX a los diferentes dominios de operación AP que puedan haber sido definidos.

2.3. El bloque de control

El bloque de control utiliza un modelo adaptativo predictivo, que define una relación matemática causa-efecto del tipo

$$\begin{aligned}
 y(k+1) = & a_1y(k) + a_2y(k-1) + a_3y(k-2) + \dots \\
 & b_1u(k) + b_2u(k-1) + b_3u(k-2) + \dots \\
 & c_{i1}w_i(k) + c_{i2}w_i(k-1) + c_{i3}w_i(k-3) + \dots
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

entre las variables de entrada y salida del proceso, para generar en cada instante de control, una secuencia de acciones de control futuras que hace que las salidas predichas del proceso coincidan con la trayectoria deseada generada por el bloque conductor. La primera de estas acciones de control es la que se aplica en cada instante al proceso. En la Ec. 1, $y(k)$ representa el valor de la variable de proceso en el instante k , u representa la entrada a proceso o acción de control, mientras que w_i representa el valor de la i -ésima perturbación. Los coeficientes a_i , b_i y c_{ij} constituyen unos factores de peso asociados a los efectos de cada una de las variables descritas sobre la variable de proceso en el instante siguiente.

Por su parte, el bloque experto determina el valor inicial de los parámetros del modelo AP para cada dominio AP en cuestión.

2.3. El mecanismo adaptativo

El mecanismo adaptativo utiliza las mediciones de las variables de entrada-salida (E/S) del proceso para:

1. Adaptar los parámetros del modelo AP con el fin de minimizar el error de predicción para cada variable de salida del proceso. No obstante, el bloque experto determina cuándo se ejecuta la adaptación, tomando en cuenta las condiciones de operación.
2. Permitir al bloque conductor rediseñar las trayectorias deseada de salida, tomando en cuenta la evolución de las variables de E/S del proceso.

2.4. Operación global del controlador

De acuerdo con la funcionalidad descrita previamente, cuando las variables de E/S del proceso evolucionan en un dominio de control experto, el bloque experto determina la aplicación de control experto. En este caso, el bloque de control calcula el vector de control según reglas que imitan la inteligencia del operador humano, siendo el objetivo de control el de conducir las variables del proceso hacia los dominios AP, donde la operación del proceso puede ser optimizada.

Asimismo, cuando las variables de E/S del proceso evolucionan en un dominio de control adaptativo predictivo, el bloque experto determina la aplicación de control AP. El mecanismo adaptativo identifica la relación causa-efecto de las variables del proceso y las variaciones de esta relación con el tiempo en un modelo AP, que el bloque de control utiliza para predecir y controlar la evolución de dichas variables. De esta forma, el error de predicción tiende hacia cero, a pesar de posibles cambios en la dinámica del proceso, y las variables del mismo convergen a trayectorias deseadas generadas por el bloque conductor las cuales se estabilizan en sus consignas.

3. Arquitectura software

De forma esquemática, la arquitectura software puede descomponerse en los elementos representados en la Fig. 2. La ejecución del laboratorio se basa en la operación coordinada de dos programas principales, servidor y cliente, generalmente instalados en computadores diferentes y conectados ambos a Internet.

El servidor se encarga de atender las peticiones de creación, configuración, ejecución y borrado de controlador que se envían desde los clientes. Para ello, éste mantiene una base de datos con la información de autenticación y permisos de los usuarios dados de alta en el laboratorio. El servidor dispone asimismo de acceso a la licencia hardware de controladores ADEX, gestionando la utilización de ésta como un recurso compartido entre sus clientes. Adicionalmente, la máquina servidor permite la descarga vía FTP del software cliente desde los computadores remotos, así como de los documentos de ayuda y manuales necesarios para su uso.

Una vez descargado e instalado el software cliente desde un computador remoto, éste puede acceder al laboratorio virtual. La configuración general de los clientes se basa en la combinación de una librería de acceso remoto al laboratorio virtual y una o varias aplicaciones que hacen uso de dicha librería y que pueden constituir, además, la verdadera interfaz de usuario. La librería se encarga de realizar las tareas de autenticación y envío y recepción de acciones sobre controladores, mientras que las aplicaciones llevan a cabo, en su caso, las simulaciones de procesos e interfaces gráficas, siempre de forma local, liberando así al servidor de todas aquellas tareas no relacionadas con el acceso a la licencia hardware y consiguiendo con ello un aumento de la eficiencia del conjunto.

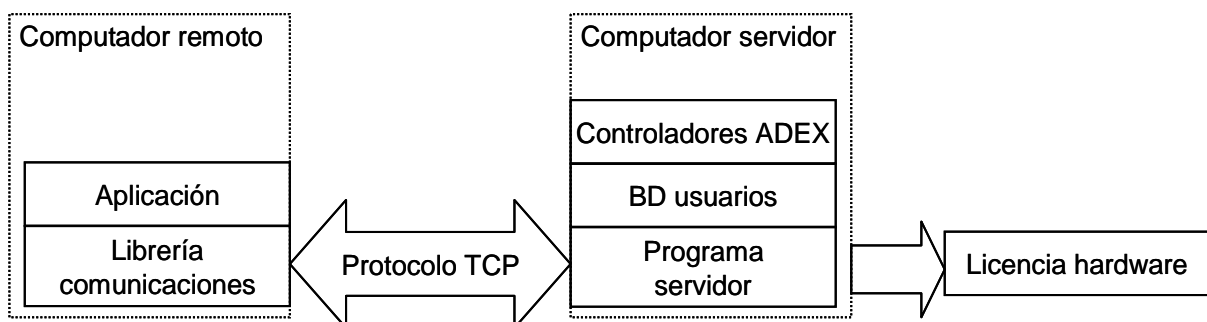


Figura 2. Elementos principales de la arquitectura software.

Como se desprende de la explicación anterior, la plataforma software desarrollada permite la ejecución de simulaciones de proceso que pueden ser controladas con el algoritmo adaptativo predictivo experto. Dichas simulaciones pueden ser descargadas desde el servidor o bien desarrolladas por los usuarios, siempre que éstos hagan uso de la librería interfaz. Este módulo se distribuye en forma de librería de enlace dinámico para el sistema operativo Win32 y sus funciones pueden usarse desde cualquier lenguaje o ejecutable que permita este tipo de llamadas, lo que aporta una gran flexibilidad en su uso. Desde un punto de vista técnico, los usuarios del laboratorio virtual podrían emplear dicha librería incluso para controlar procesos reales a través del reenvío de llamadas a controlador hacia el servidor en Internet.

Desde el punto de vista del software, la mayor parte del desarrollo del laboratorio virtual se centra en la gestión de los usuarios y del recurso compartido, así como en la optimización del protocolo de comunicaciones entre servidor y clientes. Esto confiere al laboratorio la capacidad de ser fácilmente modificado para la gestión de otros recursos compartidos, como por ejemplo, implementaciones reales de procesos que puedan ser controlados por el usuario de forma remota.

4. Desarrollo de aplicaciones cliente

Como se ha explicado anteriormente, las aplicaciones cliente acceden al laboratorio virtual a través de una librería interfaz, cuyas funcionalidad e interfaces se describen en los siguientes párrafos.

4.1. Creación y autenticación de la conexión

La conexión TCP a través de la cual se realizan las operaciones sobre controlador debe crearse y autenticarse haciendo uso de la librería interfaz antes de realizar cualquier acción sobre controlador. Dicha

librería implementa la función `TCPCreate_Connection_U()` que lleva a cabo estos pasos. Los argumentos pasados a la función, se describen a continuación.

- Dirección IP o nombre de host de la máquina servidor
- Puerto de la máquina servidor en que opera el servicio
- Nombre de usuario
- Clave de acceso

Una vez que la función se ha ejecutado correctamente, el cliente está autorizado para ejecutar las acciones que se describen en los siguientes apartados.

4.2 Creación, ejecución y borrado de controladores

La creación y ejecución de controladores se realiza a través de una única función `TCPAdxKnlNxM_U()`. Los argumentos de dicha función especifican:

- Nombre de controlador
- M consignas
- M variables de proceso
- M valores correspondientes al conjunto de M acciones de control aplicadas al proceso tras la llamada anterior
- N valores de perturbación
- Un indicador de creación o reinicio

La creación de un controlador requiere el indicador de creación en la llamada. Si el controlador existía previamente a la llamada, éste se reinicia a su último estado almacenado para la ejecución correspondiente. El almacenamiento del estado de un controlador, se consigue por medio de la función `TCPSaveCtrl_U()`, cuyo único argumento es el nombre de controlador.

El borrado de controlador se realiza con la función `TCPDelCtrl_U()`, especificando en su argumento, el nombre de controlador.

4.3 Acceso a parámetros de controlador

Como puede intuirse a partir de la Sección 2, el conjunto de parámetros que definen la configuración y el estado de un controlador es relativamente grande. Téngase en cuenta que, dependiendo del número de entradas y salidas del mismo, los datos asociados a un controlador varían desde algunos cientos hasta más de dos mil. Por ello, la librería interfaz implementa funciones de acceso a parámetros para lectura y escritura tanto a través de sus índices como de sus nombres, generados a partir de una estructura en árbol. Dichas funciones de acceso a parámetro permiten asimismo el uso de conjuntos de parámetros, con objeto de agilizar la comunicación TCP.

Dado que el conjunto de nombres de parámetros empleado está intrínsecamente relacionado con los controladores adaptativos predictivos expertos empleados, se ha decidido dotar al laboratorio virtual de una interfaz gráfica de usuario para la configuración de dichos controladores. La interfaz hace uso de la librería de usuario antes descrita y permite el acceso para lectura y escritura de parámetros, así como el guardado del estado de controlador. La Fig. 3 muestra el aspecto de dicha interfaz gráfica de usuario para un controlador de nombre `Standard_C11`. Como puede observarse, el diseño de la interfaz se corresponde con el diagrama de bloques presentado en la Sección 2. Cada uno de los bloques representados dispone de una ventana de configuración propia a la que se accede pulsando sobre ellos con el ratón, de forma que la información se presenta en forma progresiva.

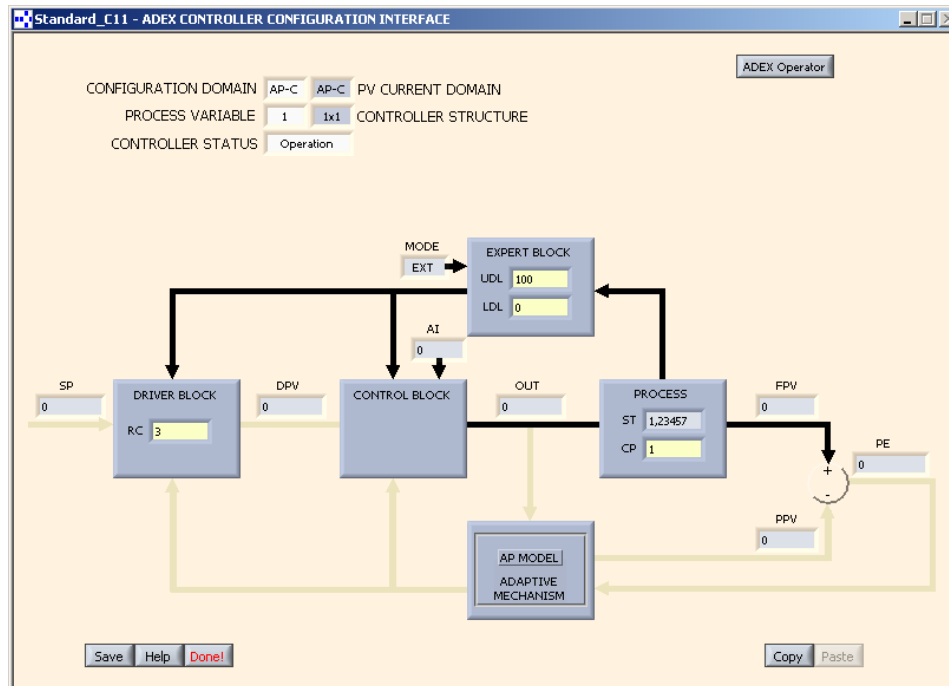


Figura 3. Interfaz de configuración de controladores ADEX.

El desarrollo de una aplicación cliente puede hacer uso, si se desea, de la interfaz de configuración de controladores presentada a través la función `AdxConf()`, en cuya llamada debe especificarse el nombre de controlador objetivo.

En la siguiente sección se presenta un ejemplo de aplicación desarrollado en el Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Control de la ETSI Industriales de la UNED, el cual posibilita la ejecución remota de los controladores requeridos para la resolución de los ejercicios de prácticas de una asignatura de control avanzado impartida en dicho departamento.

5. Ejemplo de aplicación

Como ejemplo de uso del laboratorio virtual desarrollado, se ha proporcionado a los estudiantes de la asignatura “Técnicas Avanzadas de Control” de la carrera de Ingeniería Superior Industrial en la UNED una aplicación que, haciendo uso de la librería mencionada en la Sección 3, permite al usuario la simulación de procesos con diferentes dinámicas, así como la introducción de diferentes elementos perturbadores en el proceso y su conexión a controladores ADEX en el laboratorio virtual, los cuales se ejecutan según el esquema descrito.

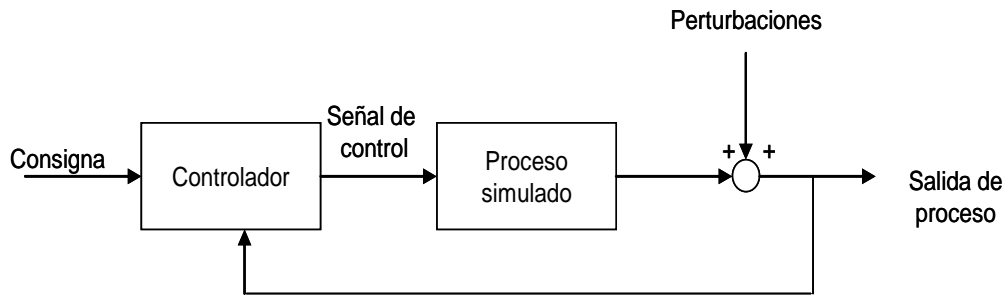


Figura 3. Operación de la aplicación de prácticas de laboratorio.

La Fig. 3 muestra el esquema de operación de dicha aplicación de prácticas de laboratorio. En ella puede observarse cómo los controladores se aplican a los procesos simulados, los cuales pueden ser configurados para presentar una determinada dinámica, así como el equivalente a perturbaciones que afectan a la salida observada. Por su parte, la ejecución de los controladores ADEX se lleva a cabo de forma remota a través de la librería del laboratorio virtual, eliminando a los estudiantes la necesidad de disponer de una licencia hardware local.



Figura 4. Interfaz de usuario de la aplicación de prácticas de laboratorio.

La Fig. 4 presenta la interfaz de usuario de la aplicación de prácticas de laboratorio. Dicha interfaz muestra, en el área de gráfica, la evolución de los valores de las variables de proceso y de control más relevantes de la operación. Variable de proceso, consigna y acción de control aparecen en color verde, rojo y amarillo, respectivamente. La interfaz muestra asimismo el error de predicción en azul, un indicador de la fidelidad del modelo interno del controlador.

La interfaz presentada permite al usuario introducir valores de entrada al proceso, a través del campo KBD, o de consigna para el controlador, en el campo SP. El sistema de control sólo considerará una de las dos anteriores, dependiendo de su estado, automático o manual, que puede seleccionarse con el

campo AUTO. Interfaces de configuración de proceso simulado y controlador están accesibles a través de los botones PROCESS y CONFIGURATOR, respectivamente, ejecutando ésta última la interfaz de configuración presentada en la sección anterior. Por su parte, los botones GO y STOP permiten arrancar y detener la ejecución del conjunto proceso simulado-controlador, respectivamente.

El usuario puede añadir un ruido de medida a la salida del proceso vista por el controlador con el fin de experimentar los efectos que éste puede tener sobre la capacidad de control o de identificación obtenida. El campo PN permite fijar la desviación típica del ruido generado mediante una distribución normal de media cero que se añade al valor de la variable de proceso.

Como complemento a lo anterior, el usuario tiene la posibilidad de modificar, con el parámetro G, la ganancia del sistema; o añadir retardos puros con DP, en ambos casos, sin redefinir el proceso.

La aplicación de prácticas se acompaña de un conjunto de ejercicios orientados a demostrar al alumno las particularidades de diferentes tipos de procesos: estables, inestables o de inverso inestable; así como los efectos de los cambios en la configuración de los controladores ADEX.

6. Conclusiones

Este artículo describe el desarrollo de un laboratorio virtual para la aplicación de control avanzado. El laboratorio permite la ejecución remota de controladores ADEX propietarios y protegidos a través de un dispositivo hardware de licencia que se encuentra en un servidor accesible a través de Internet. Estudiantes o investigadores en control avanzado pueden aplicar el control adaptativo predictivo experto a simulaciones distribuidas junto con el laboratorio virtual o programadas por ellos mismos, e incluso a procesos reales, haciendo uso de las funciones implementadas en una librería cliente constitutiva del laboratorio. El laboratorio pone, pues, a disposición de los usuarios la experimentación con este tipo de controladores sin que éstos tengan la necesidad de disponer de licencias hardware locales.

El laboratorio virtual obtenido puede extenderse fácilmente para su empleo con otros tipos de controladores, así como para la gestión de otros recursos hardware, como procesos reales o implementaciones hardware de sistemas de control.

Referencias

- [1] J. M. Martín Sánchez y J. Rodellar. *Control Adaptativo Predictivo Experto. Metodología y Aplicación Industrial*. UNED (2005).
- [2] J.M. Martín Sánchez, Adaptive Predictive Expert Control System, International Patent Application. Application N°: PCT/US00/17836 (2000).
- [3] J.M. Martín Sánchez, Adaptive Predictive Control System, USA Patent N° 4.197.576 (1976).
- [4] J.M. Martín Sánchez, Adaptive Predictive Control System (CIP), European Patent, N° 0037579 (1980).
- [5] A. Cabanillas, F. Alonso, F. Riesco y J.M. Martín-Sánchez. *Evaluación de una plataforma de Control Adaptativo Predictivo Experto en la Refinería de Escombreras*. I Seminario de Aplicaciones de Control Avanzado (2005).
- [6] J. Riesco, F. Mur y J.M. Martín-Sánchez. *Control Avanzado para la Mezcla de Materiales en la Industria del Cemento*. I Seminario de Aplicaciones de Control Avanzado (2005).
- [7] J. Malia Baró, C. Pérez Molina, J.M. Martín-Sánchez. *Optimización del Proceso Biológico en una Depuradora de Aguas Residuales*. I Seminario de Aplicaciones Industriales de Control Avanzado (2005).
- [8] J.V. Aguilar, P. Langarita, L. Linares y J. Rodellar. *Control Automático de Caudales y Nivelas en el Origen del Canal de Lodosa con Reguladores PI y Controladores ADEX*. 2nd Seminar for Advanced Industrial Control Applications (2007).
- [9] R. Requena Pérez, A. Nevado Reviriego, F. Mur Pérez. *Control Optimizado para la Red Eléctrica De España*. 3rd Seminar for Advanced Industrial Control Applications (2009).