

Integración del control adaptativo predictivo experto en los sistemas de control disponibles en el mercado

Observando la evolución en las técnicas de control desde el inicio de la automatización hasta nuestros días se pone de relieve cómo los denominados controladores PID fueron el estándar de control del pasado siglo y todavía lo siguen siendo en los albores del nuevo. Sin embargo, esta sorprendente permanencia convive ya con un potencial nuevo estándar para el control avanzado de procesos, de fácil utilización y de probada eficacia, tanto en la estabilidad como en la precisión del control que proporciona.

La metodología en la que el nuevo estándar está basado es la de Control Adaptativo Predictivo Experto. Este artículo describe la nueva metodología, basada en más de tres décadas de investigación y desarrollo, y la integración vía OPC de la misma en los sistemas de control industrial actualmente en el mercado.

Durante las tres últimas décadas, la implementación de sistemas de control industrial ha evolucionado de la tecnología analógica a la digital. El énfasis en el uso de ésta última se ha llevado a un punto en el que muchos de los avances ofertados en los modernos sistemas de control en términos de disponibilidad de memoria, velocidad de cálculo, integración en red, inteligencia distribuida y otros, son mucho más de lo necesario para llevar a cabo la optimización en el control de procesos.

Sin embargo, allí donde la competencia entre los suministradores de sistemas de control ha impuesto cambios, algo ha permanecido invariable. La herramienta estándar para el control de procesos continúa siendo el controlador PID. Esta metodología elemental, que controla las variables del proceso reaccionando al error por medio de simples ecuaciones matemáticas, parece burlarse del progre-

so tecnológico. Aquéllos no expertos en control de procesos podrían pensar que los controladores PID son capaces de resolver todos los problemas de control. Pero, lejos de ello, aunque son útiles en muchos casos, en muchos otros su rendimiento es pobre o inadecuado, y en cualquier caso tienen que ser ajustados por experimentados operadores en una labor que requiere su tiempo.

Diferentes técnicas de control han intentado en la práctica industrial superar el rendimiento del PID, suscitando grandes expectativas en el mercado debido a la necesidad existente de una mejor solución en el control de procesos. Estas técnicas son bien conocidas y pueden clasificarse básicamente en sistemas expertos, técnicas de control predictivo sin adaptación y sistemas de control adaptativo predictivo. Ninguna de estas técnicas ha sido capaz de pasar a ser el nuevo estándar en control de procesos que la industria requiere debido básicamente a las siguientes razones:

- Los sistemas expertos están basados en reglas que imitan al operador humano en el control del proceso [1], quien de hecho es el auténtico experto. Así, pues, estos sistemas son por naturaleza sistemas "ad hoc", difíciles de mantener debido al nú-

mero de reglas. Su rendimiento es limitado por el rendimiento mismo del operador y su principal ventaja es la robustez frente a condiciones de operación inciertas.

- El control predictivo, introducido en 1976 en una patente aceptada y publicada en los EEUU [2], fue un avance teórico fundamental en control de procesos. Sin embargo, las técnicas de control predictivo sin adaptación presentes en el mercado, conocidas como *Model Based Predictive Control* o *Multivariable Predictive Control* [3], requieren múltiples ensayos y conocimiento especializado para construir el modelo predictivo que requiere la acción de control. Por otra parte, una vez en operación, cuando la dinámica del proceso varía su rendimiento se deteriora.

- El control adaptativo predictivo (AP) apareció de forma natural como una solución teóricamente capaz de aproximarse mejor a la inherente naturaleza dinámica del proceso [4]. Numerosas referencias mostraron su excelente rendimiento bajo condiciones normales de operación, pero también su falta de robustez en condiciones de operación cuando la relación causa-efecto del proceso no es modelizable. Otra desventaja importante del control adaptativo predictivo fue la de ser introducida como

una solución ligada a un hardware para su aplicación, lo que dificultó enormemente su penetración en el mercado.

Así, pues, después de más de tres décadas y a pesar de las necesidades presentes y del interés extraordinario por disponer de un nuevo estándar para el control industrial, el controlador PID ha cambiado de siglo ocupando esa posición de privilegio. No obstante, en este artículo se pre-

sentan los conceptos básicos de una nueva solución metodológica, conocida como control adaptativo predictivo experto ADEX que, superando las limitaciones de las propuestas previas, puede de hecho convertirse en un nuevo estándar de control industrial.

Dominios ADEX

La metodología ADEX, introducida en una solicitud de patente PCT [5],

combina el control adaptativo predictivo con el control experto, con el fin de ofrecer una solución de control completa mediante la definición de dominios de operación para ambos en una estructura de control integrada [6].

Así, pues, la metodología ADEX permite definir dominios AP y expertos (EX) en el rango de operación de la variable bajo control. La figura de la página 76 muestra un ejemplo

Entrevista con Juan Manuel Martín Sánchez, presidente de ADEX

“El usuario de estos sistemas está reclamando capacidad de optimización, de auto ajuste y robustez”

Automática e Instrumentación. ¿Qué fue lo que le llevó al desarrollo de esta nueva solución metodológica conocida como control adaptativo predictivo experto ADEX?

Juan Manuel Martín Sánchez (JMMS). Por un lado, éramos conscientes de la falta de robustez del control adaptativo predictivo en determinadas condiciones de operación del proceso y, por el otro, de la mejora que representaría poder informar al controlador adaptativo predictivo, de forma sencilla y previa a su operación, del conocimiento del que se dispone acerca del proceso. Todo ello nos llevó a la concepción ADEX, que integra el control adaptativo predictivo con los principios básicos del control experto, resolviendo definitivamente los mencionados problemas de robustez y optimizando el rendimiento del controlador a partir del conocimiento previo del proceso.

AeI. ¿Cuál está siendo el nivel de aceptación en el mercado?

JMMS. Extraordinario. La receptividad que el mercado está demostrando hacia la tecnología ADEX responde, por una parte, a la necesidad que la industria tiene de este tipo de solución para optimizar el rendimiento de sus procesos, pero por otra, a la constatación reiterada, aplicación tras aplicación, de la realidad tecnológica de ADEX, es decir, de su capacidad de optimización, de auto ajuste y de su robustez.

AeI. Realmente, ¿es integrable con todos los sistemas de control disponibles en el mercado?

JMMS. Así es. Prácticamente todos los sistemas de control actuales disponen de drivers de comunicaciones para obtener y acceder a las variables de proceso. A través de estos drivers, las soluciones software de optimización ADEX pueden integrarse de manera extremadamente sencilla en cualquier sistema en operación, prácticamente sin modificar un ápice lo que ya esta

funcionando, pero añadiendo al conjunto el beneficio de la optimización en el rendimiento del proceso. El entorno para la integración más frecuente incluye un sistema operativo Windows de Microsoft y un servidor OPC.

AeI. ¿Cuáles son las aplicaciones industriales que requieren claramente la utilización de un sistema de estas características y por qué?

JMMS. Prácticamente casi todos los procesos industriales, por diversas razones, podrían beneficiarse de un control adaptativo. Sin embargo, allí donde los beneficios son más obvios es donde el proceso es no lineal y su dinámica varía con frecuencia. Por ejemplo, cuando el proceso tiene retardos o cuando sufre cambios frecuentes en los puntos de consigna o en las condiciones de operación. En general, siempre que la relación causa-efecto del proceso cambie, el rendimiento de una solución de control con parámetros constantes se verá afectado, tanto desde un punto de vista económico como del de operación. Ejemplos claros serían el horno rotativo y los procesos de mezcla en la industria del cemento, las columnas de destilación en refino, los procesos biológicos en las depuradoras de aguas residuales, el control dinámico de aviones y buques, etc.

AeI. Dentro de los sistemas denominados avanzados, ¿qué aplicación están teniendo hoy en día los sistemas de control multivariable, los basados en la lógica difusa u otros?

JMMS. Estos sistemas, en general, pertenecen a una clase de sistemas a la que me he referido en la contestación a la pregunta anterior como “soluciones de control con parámetros constantes”. En efecto, en algunos casos, el modelo que se deriva del proceso y se utiliza en el controlador es constante. En otros, las reglas que determinan la acción de control tienen un carácter asimétrico permanente. En cualquier caso, no son soluciones adaptativas que, a través de la información que reciben del proceso en tiempo real, sean capaces de variar

en el que se han definido tres dominios AP, uno situado en la parte central (AP-C) del rango de variación de la variable, otro en la parte superior (AP-S) al central y otro en la parte inferior (AP-I), y dos dominios expertos, uno en la parte superior del rango de variación (EX-S) y otro en la parte inferior (EX-I).

Los dominios adaptativos predictivos (AP) son aquéllos en los que la relación dinámica causa-efecto, en-

tre las variables de entrada y salida (E/S) del proceso, puede ser identificada por medio de un sistema adaptativo. En estos dominios se aplicará control AP y la operación del proceso podrá ser generalmente optimizada. Como hemos visto en el ejemplo anterior, pueden definirse diferentes dominios AP y en cada uno de ellos puede definirse una forma distinta de aplicar control AP, que será la que más convenga en

cada caso.

Los dominios expertos son dominios de operación donde el control manual puede proporcionar un control más robusto y eficiente que el control AP. Esto puede suceder cuando una relación causa-efecto entre las variables de E/S no existe o no puede derivarse en tiempo real o cuando adquirir dicho conocimiento llevaría cierto tiempo y no resultaría en una mejora sustancial sobre el

automáticamente, y en consecuencia, su ley de control. Por tanto, estas soluciones pueden tener y tienen aplicación dentro del área del control, pero no debe olvidarse su sensibilidad y limitaciones en un contexto industrial variable con el tiempo.

AeI. ¿Cómo se debe afrontar la necesidad de un sistema de control avanzado?, ¿cuándo es necesario un sistema de estas características?, ¿cómo puede saber el usuario qué es exactamente lo que necesita? y ¿dónde puede adquirirlo el usuario, es decir, quién le desarrolla al usuario un sistema avanzado en el caso de que lo necesite?

JMMS. Inicialmente es preciso identificar cuáles son las variables críticas para la calidad y la producción de nuestro proceso, definir dónde está el valor en la operación del proceso. Una vez identificadas, es preciso estimar si están bien controladas, observar si se dedica un tiempo excesivo al ajuste del sistema de control, si las variables críticas se controlan con precisión u oscilan con frecuencia y más de lo deseable, si en ocasiones es necesario recurrir al control manual y si todo ello deteriora el rendimiento del proceso. En estas condiciones, el usuario será consciente de lo que necesita o al menos desea, es decir, que no haya que perder tiempo, o tiempo excesivo, en ajustar el sistema de control, que las variables se



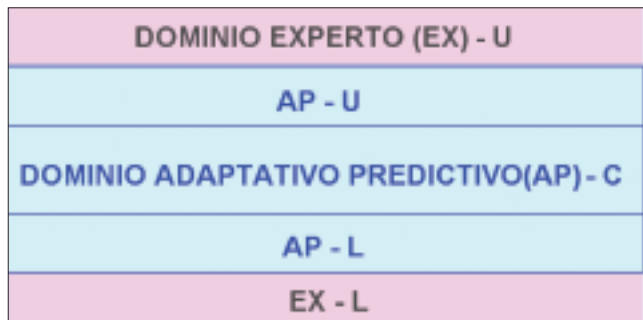
Juan M. Martín Sánchez obtuvo el título de Ingeniero Industrial en 1970 y el de Doctor Ingeniero Industrial en 1974, ambos en la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Desde 1971 a 1976, su actividad investigadora se desarrolló en diversas instituciones de Francia, el Massachusetts Institute of Technology y el Charles Stark Draper Laboratory en los EE. UU., y en la University of Alberta (U of A) en Canadá. En 1976, presentó la primera patente en control predictivo y adaptativo predictivo. Ha obtenido tres patentes internacionales más en este mismo tema. En 1986, fundó la compañía SCAP Europa, que realizó más de 150 aplicaciones industriales de control adaptativo predictivo hasta 1998. En 1999 fundó la compañía Adaptive Predictive Expert Control ADEX S.L., de la que es actualmente Presidente. Ha sido autor de más de 100 publicaciones y de tres libros en control adaptativo predictivo, ha presentado sesiones plenarias en conferencias, seminarios y congresos internacionales y ha sido miembro de la mesa editorial del *International Journal of Control*. Asimismo, ha sido profesor de la UPC, la U of A y la Universidad Politécnica de Madrid. Actualmente, es Catedrático de la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED).

controlen con precisión y estabilidad en cualquiera de las condiciones de operación y que el rendimiento del proceso sea óptimo. Actualmente, el usuario tiene que conocer, en primer lugar, que la solución a sus problemas de control ya existe y que es una solución abierta, es decir, de la que se han publicado libros y se imparten periódicamente cursos de formación, tanto cursos de carrera como cursos de postgrado e intensivos. Por ejemplo, la compañía ADEX, que disfruta de un programa NEOTEC concedido por el CDTI, imparte los mencionados cursos intensivos, transmitiendo el know-how de aplicación a terceros, y realiza aplicaciones de optimización de procesos basados en la tecnología de la que recibe el nombre y de la cual dispone de patentes internacionales.

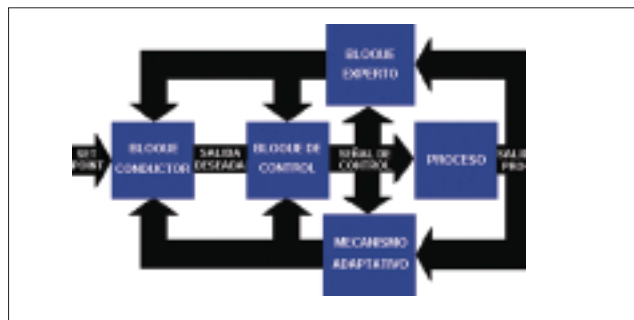
AeI. Por último, ¿en qué sectores ha sido o se está aplicando ADEX actualmente?

JMMS. Los sectores son, como es lógico, muy variados y, entre ellos se encuentran el químico, el petroquímico, el siderúrgico y el metalúrgico, el del medio ambiente, el de la energía, el aeronáutico y el naval, el de la alimentación y el de la cerámica.

Cristina Bernabeu



■ Dominios AP y EX en el rango de variación de la salida del proceso.



■ Diagrama de bloques del control Adaptativo Predictivo Experto.

control manual. Estos dominios de operación se sitúan habitualmente en los límites del rango de operación normal de las variables del proceso.

La experiencia del operador es utilizada en los dominios expertos para derivar las reglas que imitan la inteligencia del control manual. El control ADEX aplicado en los dominios expertos se diseña con el fin de conducir las variables del proceso hacia los dominios AP, donde se aplica el control AP.

Esta función del bloque experto sobre el bloque conductor evitará la aplicación de control AP cuando no es procedente y el deterioro que este tipo de aplicación conllevaría, y permitirá en estos casos una actuación de control razonable como la que llevaría a cabo el operador humano del proceso. Esta función del bloque experto por sí misma confiere al controlador ADEX una gran robustez y fiabilidad industrial.

- *Bloque conductor:* En su interacción con el bloque conductor, el bloque experto puede determinar para cada dominio AP el criterio de rendimiento para la generación de la trayectoria deseada. Así pues, a título de ejemplo, puede determinar la velocidad de cambio o pendiente de la trayectoria deseada en su acercamiento a la consigna. Si el dominio está alejado de la consigna puede desearse una gran velocidad de cambio, pero si el dominio contiene la consigna, entonces podríamos desear una velocidad de cambio menor, para que la consigna se alcance suavemente y sin oscilaciones.

- *Mecanismo de adaptación:* Por último, en su interacción con el mecanismo de adaptación, el bloque experto puede determinar: (a) cuando es conveniente adaptar o para la adaptación de los parámetros del modelo AP, dependiendo de las condiciones de operación, y (b) la reinicialización de los parámetros del modelo AP al variar el dominio de operación.

Por una parte, al introducir criterios para adaptar o para la adaptación dependiendo de las condiciones de operación, el bloque experto vuelve al mecanismo de adaptación más ro-

busto, evitando posibles deterioros de la identificación paramétrica en el modelo predictivo.

Por otra parte, y a título de ejemplo, si conocemos en forma aproximada cambios importantes de la dinámica del proceso en diferentes dominios de operación, siendo un ejemplo típico de estas circunstancias los procesos de tipo pH, el bloque experto puede ayudar sensiblemente al mecanismo de adaptación al reinicializar los parámetros del modelo AP cuando la salida del proceso cambia de uno a otro de estos dominios.

En definitiva, el funcionamiento del bloque experto permite hacer uso del conocimiento previo del que disponemos sobre el proceso y utilizarlo, por medio de la aplicación de reglas, tanto en la aplicación del control experto como en la aplicación del control adaptativo predictivo de ADEX. Es decir, la concepción ADEX supera, pues, a la del control AP previo en que la nueva metodología permite al controlador utilizar ventajosamente el conocimiento del proceso para aplicar el control apropiado, con el criterio apropiado, en los diferentes dominios de operación, adaptando y reinicializando los parámetros del modelo AP cuando es conveniente.

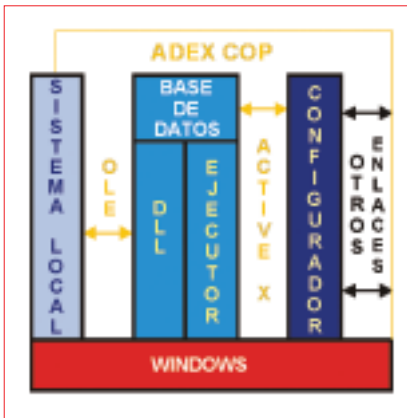
Ejemplo conceptual de aplicación

La figura superior derecha de la página 77 presenta el inicio de la señal de control calefactora en un proceso de climatización y su evolución, así como la evolución de la temperatura hasta alcanzar la consigna de 22 °C, después de una noche en la que no se gasta energía calefactora, es de-

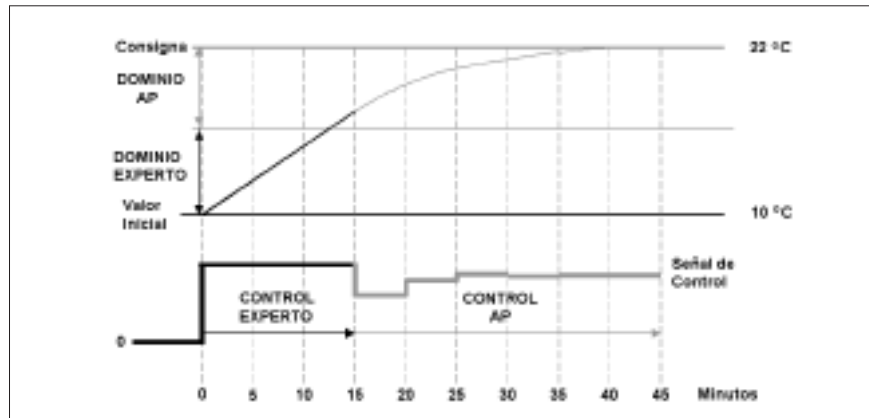
76 Diagrama de bloques y descripción funcional

El diagrama de bloques de ADEX se presenta en la figura de la página 76 y, como puede observarse, es equivalente al del control AP, pero con un Bloque Experto añadido en la parte superior. Este bloque experto, a partir de la información que recibe de las variables del proceso, es capaz de determinar y modificar la operación del bloque de control, el bloque conductor y el mecanismo de adaptación tal y como se describe a continuación:

- *Bloque de control:* Dependiendo de si el dominio de operación en el que se encuentra la variable de salida del proceso es AP o EX, el bloque experto determina la aplicación de control AP o control experto. En el primer caso, el bloque de control actuará como modelo predictivo, dentro del esquema propio del control AP, y calculará el control predictivo a aplicar al proceso. Si debe aplicarse control experto, el bloque de control actuará como un sistema por reglas que, imitando la actuación del operador humano, aplicará control experto al proceso.



■ Estructura Software de ADEX COP 1.5.



■ Ejemplo conceptual de aplicación de ADEX.

cir, en la que la señal de control es cero. El rango de variación de la temperatura, desde su valor inicial de 10 °C, se divide en un dominio experto y un dominio AP.

Como puede observarse, el dominio experto se define en una zona alejada de la consigna y donde la precisión del control no es crítica. Por su parte, el dominio AP se definirá alrededor de la consigna donde la precisión del control es importante.

Una vez iniciada la operación del controlador ADEX, como puede observarse en la citada figura, mientras la variable de temperatura permanece en el dominio experto, se aplicará control experto, imitando la operación del operador humano; pero cuando la variable entra en el dominio AP, a partir del minuto 15, se iniciará la aplicación de control adaptativo predictivo para guiar la trayectoria de la temperatura de forma suave y sin oscilaciones hacia la consigna.

Integración de controladores ADEX en el sistema de control local

La aplicación de la tecnología ADEX se lleva a cabo a través de la instalación sencilla de una plataforma software de control y optimización, denominada ADEX COP (acrónimo de *ADEX Control and Optimization Platform*), en cualquier ordenador del scada asociado al sistema local de control del proceso, siempre que dicho scada disponga de un servidor OPC o de cualquier otro estándar de comunicaciones equivalente. La fi-

gura superior izquierda muestra la estructura software de ADEX COP en su versión 1.5. Como puede observarse dicha estructura incluye:

- Un programa ejecutor, diseñado para ejecutar como un servicio Windows NT el código de los controladores ADEX.
- Una librería dinámica DLL, que gestiona en tiempo real la actualización de la base de datos utilizada por el programa ejecutor y el envío de acciones de control al sistema local.
- Un programa de configuración, que permite la definición, configuración, monitorización y la activación de ciertos modos internos de operación de los controladores ADEX.

A través de esta estructura, ADEX COP 1.5 permite al sistema de control local integrar controladores ADEX en su lógica de control, la cual puede determinar:

- El tratamiento que las variables de salida del proceso reciben antes de ser utilizadas por los controladores ADEX.
- El tratamiento que las señales de salida de los controladores ADEX reciben antes de ser aplicadas al proceso.
- La búsqueda de los puntos de operación que optimizan la operación del proceso, lo que es posible gracias al control preciso y a la estabilidad proporcionada por los controladores ADEX.

La integración de controladores ADEX y de lógica de control en el sistema local esta representada gráficamente en la figura de la página 76. El diseño adecuado de esta lógica de

control, teniendo cuenta las capacidades de los controladores ADEX, permite definir paquetes o productos de software avanzado de control y optimización que, ejecutados en el sistema local, son capaces de:

- Conseguir un control robusto y preciso de las variables críticas del proceso en todo su rango de operación, teniendo en cuenta sus interacciones.
- Buscar automáticamente las consignas de operación óptimas, guiando al mismo tiempo las variables del proceso hacia las mismas.
- Responder óptimamente a las perturbaciones cualesquiera que sean las condiciones de operación.

Nos referiremos a dichos paquetes o productos de software avanzado de control y optimización, cuando son diseñados para una aplicación genérica a un cierto tipo o clase de procesos industriales, como productos de optimización (PROP).

Aplicación de productos de optimización ADEX en paralelo con el sistema de control local

De acuerdo con la sección anterior, la versión 1.5 de ADEX COP permite definir productos de optimización PROP asociados al sistema de control local en el que se han desarrollado. Sin embargo, estos productos no serán en general reutilizables directamente en otros sistemas. Adicionalmente, la implantación de un PROP, desarrollado con la versión 1.5, implica la modificación de la lógica preexistente en el sistema de control local, lo cual suele ser poco deseable.

La versión 2.0 de ADEX COP ha sido desarrollada para poder aplicar controladores ADEX y productos de optimización basados en los mismos, actuando en paralelo con el sistema de control local y, prácticamente, sin necesidad de modificar la lógica de este último. ADEX COP permite desarrollar y aplicar productos de optimización PROP utilizando el esquema representado en la figura adjunta.

De hecho, la versión 2.0 de ADEX COP incorporará la capacidad de desarrollar lógica de control y optimización, en la que deben insertarse los controladores ADEX, dentro de su propia estructura software. En consecuencia, para desarrollar o aplicar un PROP, ADEX COP 2.0 necesitará únicamente:

- La adquisición de las variables pertinentes a la optimización, que obtendrá vía OPC desde el sistema de control local.

- A partir de dichas variables, podrá elaborar Esquemas de Control y Optimización (ECO) capaces de calcular las variables de control que deberán ser aplicadas al proceso, sin necesidad de haber modificado la lógica de control del sistema de control local.

- Finalmente, enviará vía OPC las variables de control calculadas al sistema de control local, el cual habrá sido preparado para enviar estas señales de control al proceso y para, en caso de que la comunicación OPC fallara, aplicar una lógica de enclavamiento que imponga las señales de control generadas por el mismo.

De esta forma, los PROP desarrollados con esta plataforma, ADEX COP 2.0, tienen la generalidad de poder ser aplicados independiente del sistema local existente y la modificación requerida en este último (descrita en el punto anterior) es realmente menor y su implantación, prácticamente trivial. Estas caracte-

rísticas de los PROP desarrollados con la versión 2.0 de ADEX COP facilita en gran medida, no sólo su aplicación, sino también su desarrollo, comercialización, mantenimiento y asistencia técnica.

Validación industrial de la tecnología ADEX

La evaluación de la tecnología ADEX en un proceso industrial de considerable complejidad fue facilitada por el Canal de Isabel II, al realizar éste un proyecto de carácter estratégico de implantación de tecnologías avanzadas en sus Estaciones Depuradoras, en el que se consideraba el control de procesos críticos. De esta forma, el Canal de Isabel II decidió llevar a cabo la implantación de un sistema ADEX como proyecto piloto en la fase biológica de su Estación de Aguas Residuales (E.D.A.R.) "Casaquemada" en San Fernando de Henares.

El proceso de depuración biológica elegido presenta importantes dificultades de control debido a su na-

turalidad dinámica multivariable con importantes interacciones, no lineal y variable con el tiempo, y debido asimismo al hecho de que está sometido a considerables perturbaciones aleatorias y discontinuas.

El éxito de este proyecto de validación de la tecnología ADEX fue objeto de un certificado, expedido por el Canal de Isabel II, del que citamos las siguientes frases:

Que, a pesar del carácter extremadamente complejo y variable del proceso en cuestión y de las perturbaciones que sobre él actúan, el sistema ADEX ha estabilizado definitivamente la operación del mismo, eliminando las oscilaciones, continuas y muy significativas, de la presión en el conducto principal de aire, y del

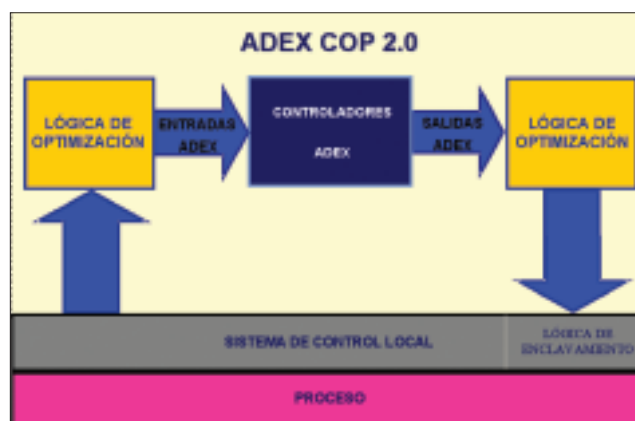
oxígeno en las distintas balsas, típicas de la operación de este tipo de procesos. El nuevo sistema varía las consignas de presión para adaptar, y minimizar, la energía consumida a los cambios que se producen en el proceso y permitir su operación óptima, con la consiguiente mejora en la calidad del agua tratada.

Conclusiones

ADEX COP resuelve los importantes problemas de control cuya solución ha sido esperada y demandada por largo tiempo, es simple en su aplicación y no requiere un conocimiento especial ni procedimientos complicados. Además de haber demostrado excelente rendimiento en su aplicación a los problemas críticos del control industrial, es compatible con cualquier sistema de control industrial actualmente en el mercado. Estas características de ADEX COP posicionan a este producto como un estándar potencial para el control avanzado de procesos industriales. El nuevo es-



■ Integración de los Controladores ADEX en la Lógica del Sistema Local.



■ Desarrollo y Aplicación de PROP utilizando ADEX COP 2.0.

tándar puede liberar de las subordinaciones que conlleva la dependencia actual de los controladores PID, particularmente en las variables críticas del proceso, donde el ajuste de las mismas es con frecuencia tedioso y necesita de personal especializado, la estabilidad y la precisión no son satisfactorias, el cambio en las condiciones de operación deteriora dicho ajuste y, en muchos casos, es preferible no utilizar el controlador PID y que sea el operador quien controle manualmente el proceso.

Al no requerir ajuste, por ser adaptativo, el rendimiento del nuevo estándar no se deteriora ni frente a cambios de las condiciones de operación ni frente a cambios en la dinámica del proceso, y es capaz de garantizar en todo momento la robustez, la estabilidad y el control preciso de las variables críticas del proceso. Gracias a estas capacidades, la utilización de ADEX COP debe conllevar una optimización en la operación del proceso, que puede tra-

Bibliografía

- Hiroka, K., *Industrial Applications of Fuzzy Technology*, Springer Verlag, 1993.
- Martín Sánchez, J.M., *Adaptive Predictive Control System*, Patente en E.E.U.U. No. 4,197,576, 1976.
- Clarke, D.W., Editor, *Advances in Model Based Predictive Control*, Oxford University Press, Oxford, Reino Unido, 1944.
- Martín Sánchez, J.M. y J. Rodellar, *Adaptive Predictive Control: From the Concepts to Plant Optimization*, Prentice Hall, 1996.
- Martín Sánchez, J.M., *Adaptive Predictive Expert Control System*, Solicitud de Patente Internacional No. PCT/IB00/01368, publicada por la World Intellectual Property Organization, 4 de enero de 1991. Aceptada y publicada en los EE.UU. y Europa
- Martín Sánchez, J.M. y J. Rodellar, *Control Adaptativo Predictivo Experto: Metodología, Diseño y Aplicación*, UNED, 2005.

ducirse, en general, en ahorro de energía y de otros recursos, en un aumento de la calidad en los productos fabricados, disminuyendo el volumen de rechazos, en una mayor seguridad y estabilidad en la operación de los procesos y en el alargamiento de vida de los mismos.

Kenneth G. Slaven

ADEX, S.L.

kslaven@adexcop.com

Pedro Balsa Hunstman

Tioxide

pedro_balsa@huntsman.com