

ELABORACIÓN DE NOTAS TÉCNICAS DE CONTROL AVANZADO PARA LA PRÁCTICA PROFESIONAL

Pablo Carbonell, Adolfo Hilario, Sergio Valero
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática
Universidad Politécnica de Valencia
Pza Ferrándiz i Carbonell, 2 03801 ALCOI
pjcarbon@isa.upv.es, ahilario@isa.upv.es, svalero@isa.upv.es

Resumen

En el presente trabajo se propone una solución para vencer la clásica laguna que se presume existente entre las tecnologías avanzadas de control de procesos y su implantación efectiva en la industria: la elaboración de notas técnicas, accesibles desde un sistema de información electrónica. Se da a su vez una clasificación preliminar de las principales áreas en las que dichas notas pueden encontrar aplicación.

Palabras clave: Control Industrial, control avanzado, integración de sistemas.

1 DESARROLLO DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN ELECTRÓNICO DE REFERENCIA

En el marco de los Proyectos de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico "Generalitat Valenciana" 2000, y con el apoyo de la Universidad Politécnica de Valencia a través de su Programa de Incentivo a la Investigación, los autores vienen desarrollando un sistema de información electrónico, incluyendo servicios de Internet y aplicaciones multimedia, que haga accesible a la Pequeña y Mediana Empresa información técnica relacionada con la normalización en el ámbito de la Instrumentación, Calibración y Control Industrial. En este proyecto se está trabajando en el desarrollo de un centro de asesoramiento por parte del Grupo de Control de Sistemas Complejos del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, y un centro de recopilación de información dirigida a las empresas a través de Internet y de aplicaciones multimedia.

El alto grado de especialización en temas de Instrumentación, Calibración y Control Industrial se considera un factor clave para el éxito de esta iniciativa, en la que la información se transmite

por medios electrónicos de forma sencilla y atractiva, proporcionando un servicio de autoformación a la Pequeña y Mediana Empresa. Esta formación está encaminada a facilitar la consecución de objetivos por parte de estas empresas tales como la certificación de Sistemas de Aseguramiento de la Calidad según ISO-9000 o ISO-14000

De entre las diferentes actividades que este proyecto propone, se va a tratar en este trabajo la dedicada a la elaboración de notas técnicas con el fin de dar difusión de varias de las técnicas avanzadas de control de procesos, cuyas bases han sido desarrolladas en las últimas décadas, pero no han encontrado todavía implantación generalizada en la industria. Este problema, identificado por varios autores [1], significa que en la actualidad existe una auténtica laguna entre la teoría de control y la práctica profesional.

La solución que este proyecto propugna pasa por la elaboración de una colección de notas técnicas que permitan tratar estas técnicas desde un enfoque práctico y accesible para los profesionales del control de procesos, evitando entrar excesivamente en detalles de tipo matemático y proporcionando interpretaciones y ejemplos de aplicación de los conceptos tratados. Además, se pretende que estas notas puedan dar varios niveles de profundización en el problema, de manera que en el último de estos niveles se proporcionaría una base suficiente como para poder acceder en un paso siguiente a los textos clásicos en los que se traten cada una de estas técnicas en detalle.

Los autores de este trabajo defienden que una adecuada difusión en el entorno industrial de estos conceptos puede ser altamente beneficioso como fuente de ideas que permitan alcanzar la búsqueda excelencia en la producción de bienes y servicios.

En las siguientes secciones se tratan los siguientes aspectos: la estructura general de las notas técnicas, su formato, y una lista preliminar de los temas que se consideran susceptibles de este tratamiento.

2 ESTRUCTURA GENERAL DE LAS NOTAS TÉCNICAS

El primero de los objetivos planteados es el de lograr la uniformidad en la estructura de las notas. La forma de presentar los contenidos debe seguir una única pauta. Por otra parte, las notas deben establecerse según diferentes niveles que vayan desde el de menor dificultad, hasta el que supone ya un cierto conocimiento previo de los conceptos tratados. A continuación se describe dicha estructura:

- **Definición** Este primer apartado, de nos más de cien palabras, debe dar idea sobre la utilidad de la técnica tratada, así como hacer mención de la base teórica que la sustenta. No se pretende ir más allá de dar a conocer al neófito los beneficios que puede proporcionar el conocimiento de la misma.
- **Ámbito de aplicación** Se indicará con mayor claridad los problemas técnicos a los que la técnica proporciona soluciones. Aquí será muy importante determinar con precisión la aplicación o aplicaciones reales que se le está dando para el estado actual de la técnica, más allá de consideraciones teóricas sobre otras hipotéticas posibilidades.
- **Ejemplos de aplicación con éxito** En este apartado debe darse ejemplos reales de procesos sobre los que haya sido posible implantar con éxito la tecnología considerada.
- **Infraestructura necesaria** Se indicará el equipamiento mínimo necesario para poder implantar dicha tecnología. Aquí será de gran interés especificar las posibilidades de reaprovechamiento de equipos en instalaciones. También se dará una valoración en términos relativos del coste de implantación del sistema de control.
- **Tiempo de desarrollo** Asumiendo que se dispone de la infraestructura descrita en el apartado anterior, se establece unos tiempos de desarrollo, en el que se incluirá a su vez los tiempos necesarios para la formación de personal cualificado.
- **Metodología** Este apartado es el mayor importancia, ya que en él se describen los pasos necesarios para la realización de una forma metódica de la fase de diseño del control. Es necesario extraer de la teoría desarrollada para esta técnica aquellos aspectos que resulten prácticos y de fácil realización.

- **Herramientas de diseño** Unido al apartado anterior, se proporcionará una visión lo más exhaustiva posible de las herramientas disponibles en el mercado que faciliten o en muchos casos hagan posible desde un punto de vista práctico la implantación de la tecnología considerada. Es un hecho constatable que cada vez más se dispone de mayor número de dichas herramientas, haciendo posible actualmente abordar el problema como uno de características exclusivamente técnicas.
- **Herramientas de análisis** En un paso de profundización superior al anterior, se ofrece un compendio de las principales herramientas matemáticas de análisis empleadas, destacando principalmente los conceptos prácticos que subyacen detrás de éstas.
- **Principales fuentes** A partir de la información suministrada, se da aquí la posibilidad de avanzar en la profundización de los fundamentos teóricas de la técnica, acudiendo a las principales fuentes, que serán recopiladas y adecuadamente comentadas, así como valorada su accesibilidad.

3 FORMATOS DE LAS NOTAS TÉCNICAS

3.1 Los soportes para la información

El conjunto de notas técnicas puede ser considerado como un sistema de documentación al que se le debe exigir que posea al menos las siguientes características:

- **Gestión de versiones.** Resulta fundamental que las versiones del material distribuido se encuentre totalmente controlado, de manera que el personal que utilizará dicho material debe ser notificado de la edición de las nuevas versiones. Las versiones anteriores deben ser correctamente retiradas y sustituidas por las más recientes.
- **Acceso rápido y cómodo.** El acceso a la información contenida en las notas técnicas debe ser rápido y amigable para cualquier tipo de usuario, desde el gerente, que debe tener una visión global, hasta el operarios que llevará a cabo una determinada tarea.
- **Contenido claro y conciso.** Dado el carácter marcadamente técnico de este tipo de documentación, el contenido debe ser expuesto de forma clara y concisa.

El soporte físico para las notas técnicas debe planificarse de manera que satisfaga las características

antes expuestas. Por lo tanto pueden considerarse los siguientes soportes:

- **Soporte papel.** Este soporte clásico es el más indicado para la consulta en planta por el operario técnico. La gran desventaja es la mayor dificultad para la actualización de versiones del material distribuido.
- **CD-ROM multimedia.** Este medio de distribución permite incluir gran cantidad de información que aporta una mejora sustancial en el proceso de recepción de información por parte del usuario. Este paquete de información susceptible de ser incluido en un CD-ROM puede estar formado por documentos interactivos en formato PDF (*Portable Document Format*) que pueden ser réplicas de la documentación en soporte papel, y también por aplicaciones multimedia interactivas incluyendo animaciones, vídeo, sonido, texto, etc. Por otra parte, el control de versiones no presenta demasiada dificultad dado que se concentra mucha información en un único soporte. Este medio es el adecuado en ámbitos de trabajo en los que se disponga normalmente de un computador dotado de lector de CD.
- **Internet.** El soporte electrónico accesible desde Internet es el mejor medio para el control de versiones, pues los usuarios acceden siempre a la información contenida en el servidor que es gestionado por el responsable de la actualización del material. Otra gran ventaja es la accesibilidad desde cualquier punto de la red.

3.2 Aplicaciones multimedia

Tanto el CD-ROM multimedia como la página WEB distribuida a través de Internet forman parte de los llamados sistemas de información electrónica, esto es, contenidos distribuidos en formato electrónico. Este tipo de información puede ser estructurado en aplicaciones multimedia o páginas WEB multimedia que presentan importantes ventajas frente a la información estática.

El objetivo principal de la utilización de aplicaciones multimedia para la distribución de las notas técnicas es aprovechar las ventajas que ofrecen estas aplicaciones para la transmisión de contenidos altamente especializados. Además, se aprovechan las ventajas que ofrecen las aplicaciones multimedia en el proceso del aprendizaje, manteniendo la motivación y la participación del usuario final que debe asimilar los contenidos transmitidos. Las aplicaciones multimedia educativas bien diseñadas

reducen considerablemente el tiempo dedicado al aprendizaje y asimilación de los contenidos, [4]. Esto es debido a la conjugación en el mismo medio de los siguientes elementos:

- La interactividad con la aplicación que refuerza el aprendizaje.
- El aprendizaje individualizado que permite al usuario o aprendiz marcar su propio ritmo.
- Varios canales de comunicación: texto, sonido, gráficos, animaciones y vídeo que producen un impacto afectivo positivo en el usuario final.

Esta constatado que la interactividad entre el usuario y la aplicación produce un refuerzo, una mayor y mejor asimilación del aprendizaje. Al trabajar con sistemas multimedia se incrementa significativamente la retención y utilización durante mucho tiempo de lo aprendido. Además, al ser un aprendizaje personalizado, el usuario puede preguntar y explorar sin inhibición alguna, con rapidez y sencillez, y con la ventaja de poder seguir su ritmo personal de aprendizaje con pocas distracciones.

Más concretamente, podemos destacar las siguientes ventajas de las aplicaciones multimedia, [4]:

- Ofrece gran rapidez de acceso a la información y gran durabilidad de la misma.
- Une todas las posibilidades de la informática y de los medios audiovisuales.
- Una aplicación multimedia bien diseñada permite actualizar con facilidad los contenidos, con pequeños cambios en el software.
- Mejora el proceso de aprendizaje, pues el usuario avanza por el sistema según su ritmo individual de aprendizaje, pedirá información, se adentrará en temas nuevos cuando tenga dominados los anteriores, etc.
- Incrementa la retención. La memorización de núcleos de información importantes aumenta significativamente gracias a la interacción y a la combinación de imágenes, gráficos, textos, etc., junto a las simulaciones con representaciones de la vida real.
- Aumenta la motivación y el gusto por aprender. El aprendizaje se convierte de este modo en un proceso lúdico.
- Reduce el tiempo de aprendizaje.

Se debe ser especialmente cuidadoso en el diseño de este tipo de aplicaciones, pues las aplicaciones multimedia mediocres o malas pueden confundir a los usuarios, inundándoles con elementos complejos y que pueden desviar su atención. Las aplicaciones multimedia para su distribución mediante CD-ROM y a través de Internet deben ser diseñadas y desarrolladas haciendo uso de una metodología ampliamente contrastada en el ámbito de la enseñanza abierta y de la enseñanza a distancia. Así, se aprovechan al máximo las capacidades interactivas del medio a partir de una estructuración adecuada de esta información altamente especializada.

En relación al diseño de aplicaciones multimedia, se puede decir que en el proceso de almacenamiento de la información por parte del ser humano, intervienen básicamente tres factores: el cognitivo, el afectivo y el factor de la experiencia previa. Esto significa que el modo en el que se graba la información en la memoria depende de:

1. La estructura de la información. Es decir, depende de que la complejidad de la información sea asumible por las destrezas cognitivas del individuo.
2. El impacto afectivo que esta información tiene en el individuo. Esto es, los sentimientos o grado de afectividad con los que ha sido recibida la información.
3. La experiencia previa. Es decir, cómo se ha reaccionado anteriormente ante información similar.

Al diseñar una aplicación multimedia, se debe tener siempre presente que no se está limitando a la simple transmisión de información. Esta información debe estar correctamente estructurada, y presentada de manera que el impacto afectivo hacia dicha información sea positivo. Así pues, para que el software educacional sea efectivo debe diseñarse correctamente, y la metodología de desarrollo debe ser tal que cumpla los siguientes objetivos:

- Realizar un diseño gráfico sistemático. Lo importante es que el aprendiz reciba la información por múltiples canales y de forma efectiva. El usuario de este tipo de aplicaciones no debe gastar tiempo en intentar entender el entorno gráfico cada vez que cambie de pantalla o de capítulo.
- Proveer a los usuarios de los mecanismos de navegación apropiados. Esto favorecerá que el aprendiz navegue apropiadamente por los

contenidos, en función de sus necesidades. Si el usuario no sabe cómo navegar, se dificultará el proceso de aprendizaje.

- Estructurar los contenidos con una conectividad lógica. El aprendiz debe construir nuevos conocimientos a partir de otros ya adquiridos, si no es así, se perderá el principio básico del aprendizaje significativo.

Por otra parte, existen una serie de **principios básicos** que han de ser tenidos en cuenta a la hora de diseñar cualquier aplicación multimedia, y en concreto una aplicación multimedia educativa, [2]:

Principio de la múltiple entrada.

Todo cuanto se puede transmitir desde una aplicación multimedia "viajará" por lo que se llaman los canales de comunicación. Es decir, en último extremo se traducirá a texto, imagen o sonido. Teniendo en cuenta que las personas tienen diferente facilidad de percepción para los diferentes canales, el principio multicanal establece que para lograr una buena comunicación hay que utilizar todos los canales. En este planteamiento se sustenta uno de los argumentos educativos (y comunicativos) de más peso a favor de las aplicaciones multimedia: un sistema multimedia es el que transmite una información mediante imagen, sonido y texto de forma sincronizada, y que hace uso adecuado de la capacidad de usar los diferentes canales de comunicación.

Principio de interactividad. La interactividad es un recurso propio de los sistemas informáticos especialmente importante, y constituye la ventaja principal de las aplicaciones actuales sobre los productos de vídeo tradicional. Por tanto, el principio de interactividad supone que siempre que pueda haber interacción debe haberla.

Principio de libertad. El objetivo del diseñador de una aplicación multimedia es que el usuario piense que navega libremente, mientras que en realidad está inmerso en un esquema de etapas predeterminado. El objetivo del guionista es ocultar este esquema. Es decir, una aplicación mal diseñada es la que aparece a la vista del usuario como una secuencia lineal de contenidos o etapas. Se debe evitar a toda costa la sucesión determinista de pantallas, es decir, la percepción de que la aplicación es un pase de diapositivas.

Principio de realimentación. Este es un principio propio de las aplicaciones destinadas a la

educación. Se trata de informar a los usuarios / aprendices de sus errores, cómo corregirlos y de los progresos conseguidos desde que comenzaron con la aplicación.

Principio de vitalidad. Se podría resumir diciendo que toda pantalla debe estar viva. Es decir, el usuario debe percibir la aplicación como algo que funciona autónomamente, como un mundo al que se asoma. Con ello se va más allá del principio de interactividad: en la aplicación siempre sucede algo, aunque el usuario no haga nada.

Principio de necesidad. Todas las aplicaciones deben regirse por el principio de necesidad: deben ser necesarias. Esto quiere decir que, para su diseño, se debe partir de dos premisas: a) La aplicación sirve para algo (necesidad de su existencia); b) La aplicación debe ser multimedia (necesidad de diseñarse bajo este enfoque).

Principio de atención. Si el guionista se deja de preocupar por la atención todo se desmorona: el objetivo de las aplicaciones multimedia es mantener la atención sostenida, es decir, conseguir que el receptor mantenga una actitud continua de expectación ante la aplicación. Para ello se dispone de dos factores: la naturaleza misma de la aplicación y la apariencia, que generan respectivamente atención cognitiva y afectiva.

4 TÉCNICAS TRATADAS EN LAS NOTAS

Sin pretender agotar todas las posibilidades, se da a continuación una lista de las notas técnicas que inicialmente constituirán la colección.

4.1 TÉCNICAS BÁSICAS

En primer lugar, se describe un primer bloque constituido por los conceptos y técnicas básicas de control industrial:

El control industrial: una visión general

Esta nota técnica dará idea del estado de la técnica en la Ingeniería de Control. Se describirá de forma clara el ámbito de aplicación actual y las aplicaciones más importantes. También dará algunas referencias básicas, así como las principales publicaciones periódicas que permiten obtener una información actualizada: como pueden ser *Automática e Instrumentación* en el ámbito de la industria española, *IEEE Control Systems Magazine* en un ámbito divulgativo internacional, y las

principales asociaciones, como la ISA, IFAC, IEEE/CSS, etc.

Selección y mantenimiento de equipos de medida

Los requisitos técnicos de un proceso industrial o de sus resultados (productos y servicios) en todas las etapas de su ciclo de vida (comercialización, diseño, fabricación, montaje, etc.) se establecen mediante especificaciones que definen intervalos de valores admisibles o tolerancias para las diferentes magnitudes que determinan su calidad. Cada vez que hay que decidir si el valor de una característica está dentro de la tolerancia especificada, es preciso medir con suficiente exactitud, fiabilidad y seguridad como para tomar esta decisión con la menor incertidumbre compatible con los condicionantes económicos.

Cada aplicación de un equipo de medida requiere de una exactitud y de unas prestaciones distintas. Si se pretendiera exigir mayor confianza a la medida que la necesaria, el coste del proceso de medida se vería incrementado sustancialmente. La elección, por tanto, se debe realizar a partir del conocimiento de las características, tanto estáticas como dinámicas, que definen el funcionamiento de estos equipos. En las hojas de especificaciones técnicas del fabricante que acompañan al equipo pueden encontrarse las características que presenta el instrumento bajo condiciones normales de calibración. Es responsabilidad del personal técnico asegurar que la información suministrada por el fabricante sea suficiente para la aplicación [8].

Reguladores industriales: selección y principios de funcionamiento

La intención de esta nota técnica es la de proporcionar una guía de selección de reguladores industriales para el profesional del control de procesos [7]. Se darán algunas ideas generales sobre el funcionamiento de los reguladores industriales PID y los principales criterios que se deben emplear para decidir la adquisición de uno u otro, como pueden ser: aplicación, tipo de entradas, tipo de salida, tipos de regulación, ajuste automático, comunicaciones, número de lazos, montaje y mantenimiento, etc.

Técnicas sistemáticas de ajuste de reguladores PID

Las reglas clásicas para sintonizar reguladores PID industriales son relativamente simples y es posible encontrarlas en cualquier texto básico sobre control automático. Las reglas de sintonización utilizadas actualmente con más frecuencia debido a la gran simplicidad y validez técnica

fueron introducidas por primera vez en 1942 por Ziegler y Nichols. Pero lo realmente interesante es analizar cómo afecta el sintonizado al comportamiento del lazo, es decir, incluir el 'comportamiento esperado' al sintonizar reguladores PID. Esto permite al ingeniero analizar si el comportamiento obtenido es tan bueno como el esperado.

El control digital Sobre los sistemas de control de procesos digitales, se considera que en una nota técnica de aplicación se debe poner relieve en los aspectos que lo diferencian del control clásico continuo, por encima de otros conceptos teóricos e instrumentales, como puede ser el uso de la transformada z . Es de gran importancia definir de forma clara los conceptos y las implicaciones del muestreo y reconstrucción y de qué modo pueden deteriorar los resultados que se preveían obtener en el control continuo. Por otra parte, se deben destacar las ventajas del control digital, como pueden ser la mayor flexibilidad en la estrategia de control y mayores posibilidades de configuración y tratamiento de los datos, etc.

Automatismos La automatización de una máquina o proceso productivo tiene como consecuencia principal, en mayor o menor grado, la liberación física y mental del hombre de dicha labor. Un automatismo se considera todo dispositivo eléctrico, electrónico, neumático, etc., capaz por sí solo de controlar el funcionamiento de una máquina o proceso.

El técnico o equipo encargado de desarrollar y aplicar un automatismo ha de conocer previamente una serie de datos importantes, como son:

1. Las especificaciones técnicas del sistema o proceso a automatizar y su correcta interpretación.
2. La parte económica asignada para no caer en el error de elaborar una buena opción desde el punto de vista técnico, pero inviable económicamente.
3. Los materiales, aparatos, etc., existentes en el mercado que se van a utilizar para diseñar el automatismo. Teniendo en cuenta: a) Calidad de la información técnica de los equipos, b) Disponibilidad y rapidez en cuanto a recambios y asistencia técnica.

En la nota técnica se realizará una descripción de cada una de las fases de desarrollo:

1. Estudio Previo: Conocimiento detallado de las características, el funcionamiento, etc., de la máquina o proceso a automatizar. Esta es la base mínima a partir de la cual se podrá iniciar el estudio de los elementos más idóneos para la construcción del automatismo.
2. Estudio Técnico-Económico: Es la parte técnica de especificaciones del automatismo: relación de materiales, aparatos, su adaptación al sistema y al entorno en el que se haya inscrito, etc. Valoración de la parte operativa del comportamiento del automatismo, como mantenimiento, fiabilidad, etc. La valoración económica será función directa de las prestaciones y necesidades del mismo.
3. Decisión Final: En los apartados anteriores se han debido estudiar las dos posibilidades u opciones tecnológicas generales posibles: lógica cableada y lógica programada. Con esta información y previa elaboración de los parámetros que se consideren necesarios a tener en cuenta, se procede al análisis del problema.

Sistemas de Supervisión, Control y Adquisición de datos Scada viene de las siglas de "Supervisory Control And Data Acquisition", adquisición de datos y supervisión de control. La nota técnica describirá el concepto de scada y las funciones principales de un sistema scada:

- Adquisición de Datos: El sistema ha de recoger, procesar y almacenar la información recibida.
- Supervisión : Un Scada debe mostrar en la pantalla de un monitor la evolución de las variables del sistema a controlar.
- Control: ha de permitir modificar la evolución del proceso actuando bien sobre los reguladores autónomos básicos (consignas, alarmas, menús, etc..) bien directamente sobre el proceso mediante las salidas conectadas.

Del mismo modo se desarrollarán las funciones específicas de todo sistema scada:

- Transmisión de información con los dispositivos de campo y con otros Pc
- Base de Datos. Gestión de datos con bajos tiempos de acceso
- Presentación de los datos de forma clara y atractiva para el usuario. Utilización de representaciones gráficas

- Explotación de los datos adquiridos para gestión de producción, mantenimiento, gestión de la calidad y control estadístico.

Por último, se enumerarán los requisitos que debe cumplir todo sistema scada, los diferentes módulos que lo componen, y se proporcionará una lista de los principales productos disponibles en el mercado.

4.2 TÉCNICAS AVANZADAS

En segundo lugar, se consideran a continuación aquellas notas que deben aportar información sobre técnicas avanzadas de control industrial, entendiendo por tales aquéllas que aún no han encontrado amplia implantación en la industria.

El control basado en el espacio de estado

Aunque el enfoque clásico de diseño de sistemas de control basado en las técnicas de lugar de las raíces o en el dominio de la frecuencia es bien conocido y ha dado lugar al bien conocido regulador PID industrial, cuando se pretende realizar el control de sistemas de orden elevado o de sistemas multivariables la aplicación de las técnicas clásicas puede resultar ciertamente engorrosa. La representación interna de los sistemas o representación en el espacio de estado abre un importante abanico de posibilidades de difícil aplicación en la teoría clásica, como son: control de sistemas multivariables, control óptimo, control adaptativo, técnicas clásicas de control no lineal y métodos constructivos de control no lineal.

Técnicas de identificación de sistemas dinámicos

La identificación de sistemas puede revestir interés no tan sólo para el técnico de la Ingeniería de Control, sino para todo aquél interesado en la obtención de modelos dinámicos de cierta exactitud de determinado proceso. Por tanto, su tratamiento debe hacerse desde un punto de vista independiente de la Teoría de Control. Puede dividirse la nota técnica en dos apartados elementales: la identificación no paramétrica [6], de gran utilidad para la identificación *grosso modo* de una gran mayoría de procesos y la identificación paramétrica por mínimos cuadrados. En este último caso debe primar la descripción de la metodología instrumental, empleando alguno de los paquetes de diseño disponibles en el mercado, sobre la analítica [10].

Control óptimo Las técnicas de diseño de sistemas de control óptimo, o LQG (*Lin-*

ear Quadratic Gaussian) utilizan la representación en el espacio de estado de la planta. Esta representación permite extender la metodología de diseño a sistemas de orden elevado y a sistemas multivariables. El control óptimo está basado en la definición de una función de coste que combina todas las especificaciones de funcionamiento disponibles. Esta función de coste es una función escalar real que puede ser minimizada para conseguir el mejor controlador y más simple. Aunque en el control óptimo se intenta evitar el diseño iterativo necesario en el control clásico, normalmente se debe modificar la función de coste hasta obtener un controlador adecuado. Las desventajas del control óptimo frente al control clásico es que se pierde la percepción intuitiva del efecto de las distintas estructuras del controlador sobre la respuesta del sistema. Además, en la función de coste no se incluyen las especificaciones de robustez, aunque se puede aplicar la técnica del LTR (*Loop Transfer Recovery*) para mejorar la robustez del diseño realizado. Por otra parte la inclusión en la función de coste de especificaciones relativas al rechazo ante perturbaciones está bastante limitado, por lo que se debe combinar con técnicas clásicas como el control integral. Por último, otra desventaja de este enfoque de diseño es que el orden del controlador es igual al de la planta, siendo necesario en muchas ocasiones aproximar el diseño obtenido mediante un controlador de orden reducido, [3], [5].

Control adaptativo

La mayor parte de los diseños de controladores realizados, no sólo bajo el enfoque de la teoría clásica sino también los realizados utilizando técnicas basadas en la representación en el espacio de estado, se basan en la suposición de que el sistema que se desea controlar no cambia con el tiempo una vez identificado. En la práctica, esta suposición puede aplicarse a muchos sistemas de control con especificaciones de funcionamiento no demasiado exigentes. Pero existen ciertas aplicaciones en las que se pueden producir variaciones debidas a (1) modificaciones de la planta, como por ejemplo nuevos componentes; (2) características no lineales, de manera que al cambiar el punto de trabajo, cambian las características de la planta; (3) deterioro gradual; (4) cambios en los retardos puros debidos a factores tales como el movimiento físico; (5) perturbaciones variables tales como cambios en la calidad de los materiales o condiciones ambientales. Por lo tanto, resulta intere-

sante acometer el diseño de una estructura de control que compense automáticamente estos cambios en la planta, [19], [9].

Control robusto El análisis de robustez de los lazos de control es quizás uno de los aspectos más prácticos de la Teoría de Control, pero al mismo tiempo más complejo si atendemos a la Teoría del Control Robusto. Por tanto, es preferible en una primera aproximación acudir a una descripción conceptual de las principales conclusiones que se derivan de la teoría, como son el Teorema de Pequeña Ganancia, la interpretación y las limitaciones de los márgenes de fase y de ganancia, las funciones de sensibilidad y sensibilidad complementaria [18], etc. Todas estas son ideas de inmediata aplicación para la mejora del diseño de control de procesos y que si no han encontrado mayor difusión es precisamente por el fuerte despliegue matemático y abstracción empleados habitualmente en los libros dedicados a esta disciplina [20]. El término robustez se está empleando cada vez con mayor naturalidad en el entorno industrial y cada vez será mayor la demanda de esta característica a los lazos de control. Es muy probable que un enfoque como el que se le pretende dar a esta nota técnica contribuya a crear una mayor conciencia del problema y de las soluciones que el control robusto proporciona.

Control inteligente En primer lugar se debe indicar que si se considera el control inteligente como una de las técnicas más adecuadas para el desarrollo de su correspondiente nota técnica es por la necesidad real que gran número de ingenieros de control tienen de conocer los conceptos básicos que se encuentran detrás de la lógica borrosa, de las redes neuronales, de los sistemas expertos, etc., ya que éstas aparecen implementadas cada vez en mayor número de aplicaciones [16]. No es nada raro tener que programar un autómata o un regulador industrial que ofrezca la posibilidad de empleo de reglas basadas en lógica borrosa [17]. Por tanto, en este caso, quizás en mayor medida que en otros anteriores, queda clara la utilidad de una descripción conceptual y divulgativa de estas teorías.

Control no lineal: técnicas clásicas Por las técnicas que denominamos *clásicas* en el control de sistemas no lineales se entiende que son las de la función descriptiva, los sistemas de L'ure, el criterio del círculo, de Popov, teoremas de pequeña ganancia para incertidum-

bres de sector, técnicas gráficas de análisis de sistemas saturados y conmutados, ciclos límite, etc [12]. En definitiva todo un importante bagaje de técnicas en su mayoría gráficas y que resultan en la práctica de gran utilidad para el análisis de gran número de efectos debidos a no linealidad presentes en sistemas que son básicamente lineales a excepción de ciertas componentes localizadas [6]. Es evidente que a pesar de todos los avances en la Teoría de Control No Lineal, siguen siendo estas técnicas de gran utilidad, así como muy simples conceptualmente y de fácil aplicación, por lo que creemos adecuado incorporarlas al *corpus* de las notas técnicas.

Control no lineal: métodos constructivos

Por métodos constructivos de control no lineal hemos venido a designar las técnicas de análisis y diseño basadas en propiedades estructurales de los sistemas no lineales. Es evidente que las técnicas basadas en la geometría diferencial resultan excesivamente abstractas, aunque aportan algunos conceptos que consideramos adecuados para su difusión en una nota técnica, como pueden ser los de grado relativo, dinámica nula o la *matching condition* de la incertidumbre [11]. Deben apuntarse aspectos técnicos como son la robustez, los esquemas adaptativos y los observadores [14]. También es interesante resaltar el aspecto de ciertas no linealidades como beneficiosas para el control, así como los conceptos de alta ganancia y amortiguamiento no lineal [12]. Sin embargo, de mayor aplicabilidad práctica parecen resultar las técnicas constructivas de *backstepping* y *forwarding*, que serán descritas aquí sólo de un modo intuitivo [13]. Otros conceptos, como el de pasivización y activación, resulta altamente intuitivos [15] y pueden ser a su vez incorporados a esta nota técnica.

5 CONCLUSIONES

La Ingeniería de control puede considerarse actualmente una disciplina madura en cuanto al riguroso tratamiento del problema del control. Sin embargo, la transferencia de esta tecnología a la industria es más que deficiente, pudiendo considerarse que en la mayoría de las plantas industriales se siguen empleando actualmente métodos y técnicas que muy pronto cumplirán medio siglo. Es necesario comenzar a implantar las nuevas tecnologías, ya que ello supondrá un importante beneficio en calidad y en ventaja competitiva.

Hacer más accesible la teoría desarrollada a la práctica industrial, acercar los conceptos teóricos

a las aplicaciones, son sin duda la principal tarea y el mayor reto al que el Control de Procesos se enfrenta actualmente. Las notas técnicas descritas en este trabajo pretenden allanar el camino que conduzca a la consecución de este anhelado objetivo.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado en parte por el proyecto GV00-088-14 de la Generalitat Valenciana y por el programa de Incentivo a la Investigación de la UPV.

Referencias

- [1] Astrom, K.J., (2000), "Limitations on control system performance", *European Journal of Control*, vol. 6, no. 1.
- [2] Bou Bouzá, G., (1997) , El Guión Multimedia, Ed. Anaya.
- [3] Burl, J.F., (1998), Linear Optimal Control, H_2 and H_∞ Methods, Addison-Wesley, Menlo Park, California.
- [4] Colmenar, A., (1999), Tesis: Propuesta de diseño curricular en un marco constructivista para los diferentes niveles del nuevo sistema educativo: aplicación a las energías renovables, Director: D. Manuel-Alonso Castro Gil, ETSII - UNED.
- [5] Floudas C.A., Pardalos, P.M., edited by, (1992), Encyclopedia of Optimization, Volume 1-6, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- [6] Friedland, B., (1996), Advanced control system design, Prentice-Hall, New Jersey.
- [7] Galceran, S., Sudrià, A.,(1999), "Reguladores industriales universales", *Automática e Instrumentación*, no. 296, pp. 109-124.
- [8] Hilario, A., Carbonell, P., (2001), Calibración de equipos de medida según ISO 900, Cetisa-Boixareu, Barcelona.
- [9] Ioannou P.A., Sun, J., (1996), Robust Adaptive Control, Prentice Hall, New Jersey.
- [10] Iserman, R., (1992), Adaptive control systems, Prentice-Hall, New York.
- [11] Isidori, A., (1995), Nonlinear control systems, Springer, Berlin.
- [12] Khalil, H.K., (1996), Nonlinear systems, Prentice-Hall, New Jersey.
- [13] Kokotovic, P., Arcak, M., (1999), "Constructive nonlinear control: Progress in the 90's", *Proc. of the 14th IFAC World Congress*, vol. 4, pp. 49-77.
- [14] Marino, R., Tomei, P., Nonlinear control design: Geometric, adaptive and robust, Prentice-Hall, London.
- [15] Ortega, R., van der Schaft, A., Mareels, I., Maschke, B., (2001), "Putting energy back in control", *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 21, no. 2, pp. 18-33.
- [16] Passino, K.M., Yurkovich, S. "Fuzzy control", (1998), in W.S. Levine editor, The control handbook, pp. 1066-1084.
- [17] Reyero, R., Nicolás, C., (1995), Sistemas de control basados en lógica borrosa : fuzzy control, Omron Electronics, Madrid.
- [18] Sanchez Peña, R., Sznaier, M., (1998), Robust systems, theory and applications, John Wiley & Sons, New York.
- [19] Warwick, K., "Adaptive Control", (1993), in S.G. Tzafestas editor, Applied Control, pp. 233-271.
- [20] Zhou, K., Doyle, J.C., Glover, K., (1996), Robust and optimal control, Prentice-Hall, New Jersey.