

# CONTROL INTELIGENTE

**Ramón Galán,**  
Lic. y Dr. en  
Informática,

**Ricardo Sanz,**  
Dr. Ingeniero Industrial  
por la UPM,

**Fernando Matía,**  
Dr. Ingeniero Industrial  
por la UPM,

**Agustín Jiménez,**  
Dr. Ingeniero Industrial  
por la UPM.

*Departamento de Automática, Ingeniería Electrónica e Informática Industrial.  
Universidad Politécnica de Madrid.*

**RESUMEN:** En este artículo se introducen el Control Inteligente y las técnicas de inteligencia artificial que se usan en el diseño de sistemas de control complejos, que, por su dificultad, son inabordables por técnicas clásicas. También se presentan algunos de los proyectos que los Grupos de investigación españoles, pertenecientes a la sección Española de la Federación Internacional de Control Automático CEA-IFAC, han desarrollado en el sector del Control Inteligente de Procesos.

## 1. INTRODUCCIÓN

El control inteligente comprende una serie de técnicas (tomadas fundamentalmente de la inteligencia artificial) con las que se pretenden resolver problemas de control inabordables por los métodos clásicos (Sanz).

Cuando observamos en detalle la lista de actividades de un sistema de control vemos claramente dos tipos diferenciados. Por una parte, actividades que conducen a la modificación del mundo y, por otra, actividades de procesamiento de información con un cierto grado de abstracción. Ambos tipos de actividades son en cierta medida calificables como conductivas y cognoscitivas (Galán).

El control clásico

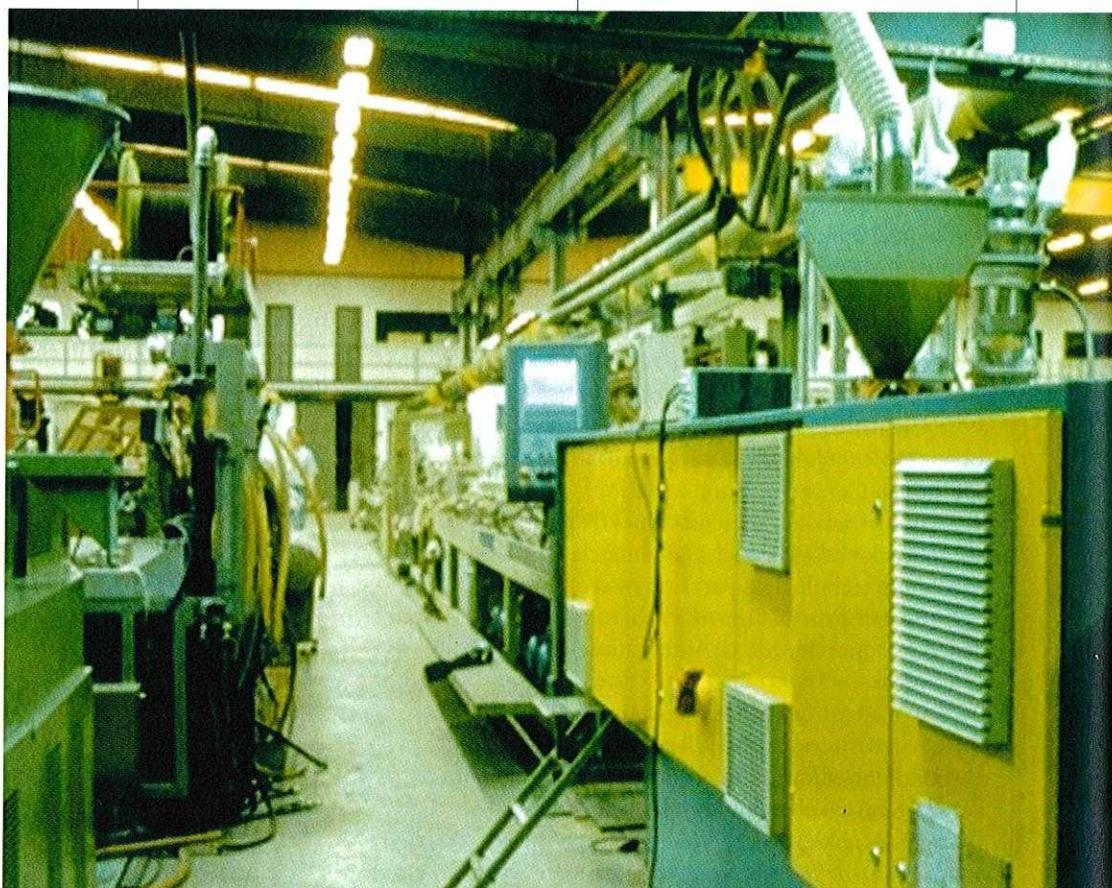
consta esencialmente de tratamiento de información en un nivel numérico y actuación sobre el mundo, no apareciendo en él actividades cognoscitivas de alto nivel de abstracción. Es por ello que en muchos casos se debe añadir a este tipo de controles la supervisión de un ser humano. El término Control Inteligente se utiliza para hacer referencia a un control en el que las actividades cognoscitivas tienen especial importancia. Dentro de este tipo de problemas son de especial importancia los derivados de los comportamientos impredecibles (tales como los ocasionados por ma-

las funciones) de los sistemas a controlar.

## 2. HISTORIA

En el origen de los trabajos en control inteligente cabe destacar la figura de K.S. Fu por sus trabajos con "recognition in the loop", descritos y comentados por Meystel.

Luego, a mediados de los 80, se produce el desarrollo teórico por parte de grupos de trabajo universitarios que plantean el fundamento teórico de este tipo de sistemas desde la perspectiva de la inteligencia artificial, el control y la interacción de sistemas



jerárquicos. Se desarrollan las primeras aplicaciones de sistemas expertos reales:

- Sistemas de 1ª Generación, en los que se logra implantar conocimiento de control, tomado de operadores expertos, en forma de reglas.
- Sistemas de 2ª Generación, basados en modelos de los procesos que manejan.

En esta época también, aparecen las primeras herramientas específicas que permiten el desarrollo eficaz de sistemas inteligentes de control.

Pero ha sido en la década de los 90 cuando el Control Inteligente ha alcanzado su desarrollo. Los Centros de investigación, libros, Conferencias, Congresos y reuniones científicas dedicados al tema son muy numerosos. Mención especial merecen los proyectos internacionales de investigación financiados por entidades europeas o americanas, que han realizado una importante labor de desarrollo de técnicas y de transferencia de tecnología dando lugar a muchas aplicaciones industriales.

El Control Inteligente es el resultado de la intersección del Control Automático, la Inteligencia Artificial y los sistemas informáticos distribuidos de tiempo real.

### 3. TÉCNICAS BÁSICAS

Entre las técnicas de Inteligencia Artificial usadas en Control Inteligente destacan:

#### 3.1 Sistemas expertos

Basados en el uso de las técnicas y herramientas de diseño de sistemas expertos de Inteligencia Artificial.

En este tipo de sistemas la base de conocimientos de control se obtiene de un experto humano: el operador del proceso a controlar. En ella se recogen esencialmente dos tipos de información: reglas referentes a la interpretación del estado del proceso y reglas para la determinación de las actuaciones. Para aumentar su eficiencia, las reglas se clasifican en grupos o metaniveles.

#### 3.2 Lógica borrosa

Se trata de un control basado en reglas que utiliza técnicas para manejar la imprecisión. Cabría separar el estudio de los controladores borrosos como alternativa al control adaptativo, predictivo u otros del control experto que utiliza incertidumbre.

Los reguladores borrosos tratan de implantar estrategias de control expresadas en términos lingüísticos por los operadores de proceso, para ello se basan en técnicas de lógica borrosa.

La lógica borrosa ha alcanzado un notable desarrollo tanto en el estudio formal como en el de aplicaciones y herramientas para diseño disponibles.

#### 3.3 Redes neuronales

Una red neuronal es, siguiendo a Hecht-Nielsen, "una estructura de procesamiento de información paralela y distribuida, formada por elementos de procesamiento interconectados mediante canales unidireccionales de información". Cada elemento de procesamiento tiene una conexión de salida con diferentes ramas portadoras de la misma señal. Esta señal de salida será de un tipo matemático cualquiera. Todo el procesamiento que se hace en un elemento debe ser completamente local, por ejemplo: dependerá sólo de los valores actuales de las entradas al elemento y de posibles valores almacenados en memoria local.

Las redes neuronales en control se utilizan por su capacidad de aprender el comportamiento no lineal de las variables de un proceso. Esta capacidad se puede utilizar para el diseño de sistemas que funcionen como simulador, identificador o controlador.

#### 3.4 Algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos se están utilizando en control, entre otras aplicaciones, para depurar de forma automática las reglas que forman la base de conocimiento. Ésta se equi-

para a un conjunto de organismos vivos, capaces de evolucionar para adaptarse mejor al entorno. Esta adaptación se medirá a partir de la tasa de fallos y aciertos de los individuos.

Al igual que en la evolución de la especie, cuando se produce una variación del entorno, sólo los que se adaptan a esa variación sobreviven, mientras que los que no pueden adaptarse son eliminados. A lo largo del tiempo van naciendo nuevos individuos que pasan a formar parte de la comunidad, con características genéticas que les hacen parecerse a sus padres, y permiten que la especie se mantenga. En algunas ocasiones se producen mutaciones que dan lugar a individuos mejor o peor adaptados.

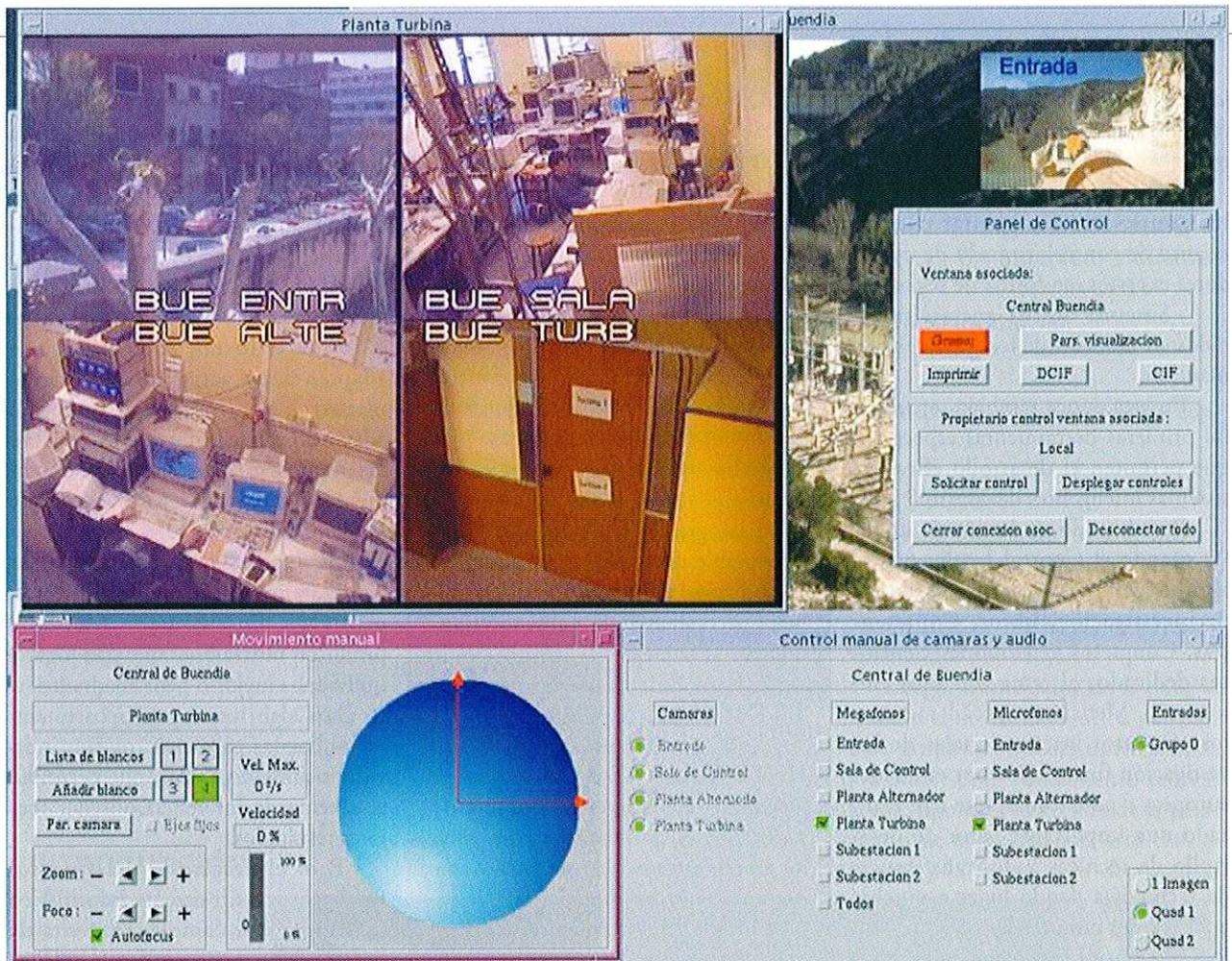
Los algoritmos genéticos toman reglas buenas para crear nuevos individuos similares a ellas, que permitan al sistema de inferencia obtener mejores resultados.

Pero el desarrollo del Control Inteligente como sistema informático de tiempo real complejo necesita de herramientas que permitan la colaboración a un fin común de técnicas muy diversas, entre otras:

- Técnicas de integración de sistemas heterogéneos.
- Desarrollo de Arquitecturas *Software*.
- Desarrollo de estándares para la normalización de las interfases de programas (IDL).

### 4. CENTROS DE DESARROLLO EN ESPAÑA

El desarrollo del Control Inteligente en España ha estado ligado a los centros de desarrollo de la Inteligencia Artificial de las grandes empresas (Unisys, Xeros, IBM, etc.) que crearon centros de investigación específicos y, por supuesto, a la Universidad. Los grupos de investigación que forman CEA-IFAC, la sección Española de la Federación Internacional de Control Automático, han jugado y siguen jugando un papel muy importante en este desarrollo de tecno-



logía y su transferencia a la industria española.

Dentro de las Jornadas de Automática que se organizan anualmente por parte de los profesores del área de conocimiento de Ingeniería de Sistemas y Automática, se creó un grupo de trabajo específico sobre Control Inteligente. Este foro ha permitido intercambiar experiencias, crear un *know-how* que ha dado lugar a libros, Seminarios, Cursos y programas de doctorado.

Son muchos los proyectos de colaboración con la industrial nacional, así como proyectos de financiación europea que se han desarrollado por estos grupos. Se recogen a continuación algunos de ellos.

El grupo de la Universidad Politécnica de Madrid mantiene una línea de investigación en Control Inteligente de Procesos desde 1992 que se centra en el desarrollo y aplicación de tecnologías avanzadas de control en

el campo del control de procesos industriales continuos.

En particular, el mayor esfuerzo se dedica a la integración de técnicas de inteligencia artificial con aplicaciones de control convencionales. El objetivo final que se pretende conseguir es el uso de representaciones avanzadas de conocimiento sobre los sistemas a controlar – modelos - capaces de dar soporte a toda la gama de aplicaciones que se emplean en un sistema de control de procesos: monitorización, control, diagnóstico, predicción, optimización, etc.

Esta actividad se desarrolla en forma de proyectos de investigación propios o proyectos de investigación y desarrollo con empresas del sector. Entre los proyectos más recientes están:

**SINCRO:** sistema inteligente de control del proceso cerámico mediante el uso de metodología AMFE (1995-96). Fue desarrollado para la

**Empresa Nacional del Uranio (ENUSA).** Su objetivo fue el desarrollo de una herramienta para el Análisis modal de fallos y efectos, para el control de un proceso de fabricación de barras de combustible en reactores nucleares.

**TOPKAPI:** Controlador borroso para el ELI-4000 (1995-96). Para la empresa Eliop, S.A. El objetivo fue la implementación de un motor de inferencia borroso para un autómata y de la herramienta gráfica correspondiente para su configuración.

**MITA:** Metodología de Integración y Técnicas Avanzadas de control Inteligente de procesos continuos (1994-97). Tenía como objetivo el desarrollo de una metodología de integración de técnicas de control inteligente para procesos continuos.

**EXEX:** Sistema Inteligente de Control de Extrusión (1995-98). Diseño de un sistema de control inteligente de producción de perfiles de

PVC y ayuda a la corrección de defectos, para la empresa Veka Ibérica, S.A.

Las funciones fundamentales son dos:

- Sistema Experto Asesor de defectos para ser consultado por los operadores de planta cuando aparecen defectos en los perfiles. El conocimiento está agrupado por líneas de producción y por perfiles, existiendo grupos de reglas de carácter general, particular de una línea y particular de un perfil.

- Control de la geometría del perfil. Para llevar a cabo esta tarea se han construido un sistema experto y un controlador borroso que cooperan en la identificación y solución de la distribución irregular de material en el perfil. Se ha diseñado una arquitectura *software* distribuida que permite la integración de diferentes técnicas de control así como interfaces adecuadas a cada tipo de usuario y al proceso.

El sistema está instalado en la fábrica de Veka Ibérica, en Burgos. Recientemente se ha diseñado una versión multilingüe para ser usada por las diferentes fábricas del Grupo Veka.

HYDRA-Visión (1996-98). Para Unión Fenosa Ingeniería, S.A. Sistema de Supervisión y Vigilancia que permite desatender las Centrales hidráulicas de Unión Fenosa.

El objetivo del proyecto *Hydra-Visión* se enmarca dentro del proyecto *Hydra* de Unión Fenosa que consiste en la implantación de un sistema multidisciplinar orientado al telecontrol y la televigilancia de centrales hidráulicas. *Hydra-Visión* se centra en la parte de televigilancia y asistencia al sistema de alarmas de *Hydra*. La finalidad del telecontrol se centra en disponer de un servicio más adecuado de las centrales desatendidas dotándolas de realimentación con información audiovisual. Con ello se consiguen varias ventajas como minimizar el personal en las centrales y disponer de personal altamente cuali-

ficado, localizado en los centros de control, que pueda atender a la resolución de problemas en varias centrales sin necesidad de desplazarse hasta las mismas. *Hydra-Visión* se integra además con los sistemas de control para atender a ciertas demandas de información audiovisual asociadas a alarmas.

El sistema permite disponer de la información audiovisual en tiempo real y permite que la comunicación desde los puestos de control con las centrales sea bidireccional, tanto en la parte de audio como en la de vídeo.

DIXIT: *Distributed Information Technology for Strategic Multiobjective Process control*. ESPRIT 22130. (1996-98). Se desarrollo de tecnología e infraestructura para construcción de sistemas de control estratégico multiobjetivo en entornos de cómputo distribuido heterogéneo.

Se han desarrollado dos aplicaciones de demostración, una de gestión de riesgos y emergencias para Repsol Química y otra de estimación *on-line* de calidad y coste para Lafarge Ciments.

PROQUS: *Advanced Model Based Process and Quality Supervision in Steel Production*. INCO-DC 962074. (1998-2000)

Desarrollo de tecnologías de control inteligente basado en modelos en la industria de procesos continuos, con especial atención a la producción de acero.

El grupo de la Universidad Politécnica de Cataluña tiene en estos momentos en marcha los siguientes proyectos:

- Técnicas de Razonamiento cualitativo para Control Inteligente de Sistemas de Producción (1996-1998)

- WAHRPS: *Worlds for Assessing Human Reasoning Process Supervision* (1995-1998)

- WATREPLA: *Supervision Monitoring and Control of Water Treatment Plants* (2000-2002)

- MIDEPAR: Monitorización inteligente preventiva de estaciones depuradoras de aguas residuales (2001-2003)

Este último, continuación de un trabajo previo sobre control avanzado para procesos de descontaminación, trabaja en la detección rápida de situaciones anómalas utilizando técnicas de control inteligente: redes neuronales, lógica difusa, sistemas expertos y razonamiento cualitativo. Se dispone de datos de la instalación depuradora de Sallent que permitirán verificar el modelo de simulación. Este proyecto se realiza en colaboración con LAAS, UdG, Cetenasa y la Universidad de Perpignan.

El grupo de la Universidad Politécnica de Valencia, fue, junto con el de la Politécnica de Madrid, uno de los pioneros en el desarrollo, ligado curiosamente, en ambos casos a la industria del cemento desarrollando sistemas de control basado en sistemas expertos.

Los proyectos más recientes son:

- *Desarrollo de Sistemas de Control Inteligente para el Control de Procesos*; proyecto financiado por la CICYT, TAP93-0596-C04-01 (1994-1996).

- MARCK: *Multi-process Adaptive Real-time Control for a Kiln*, proyecto ESPRIT, no.20.829 (Nov.94 – Abril.97).

- *Control Adaptativo Inteligente de Procesos Complejos*, proyecto financiado por la Generalitat Valenciana, GV97-TI-04-591 (Enero 1998- Enero 2000). Prorrogado hasta enero de 2002 mediante financiación de la U.P.V.

- IMPACT: *Integrated Manufacturing and Production for the Ceramic Tile Industry*, proyecto BRITE/Eu-Ram BE96-3632 (Mayo 97 – Mayo 99).

- *Automatización Integral de una terminal marítima de contenedores*, proyecto FEDER-CICYT 1FD97-2158-C04-03 (Enero 2000-Dic. 2001)

- *Perfeccionamiento en línea de controladores. Aprendizaje y control iterativos.* Proyecto GV00-100-14 (Enero 2001- Dic. 2002).

- *Desarrollo de un sistema de información electrónica de referencia y de asesoramiento en materia de Normalización en el ámbito de la Instrumentación, Calibración y Control Industrial.* GV00-088-14 (Enero 2001- Dic 2002)

El Grupo de la Universidad de Sevilla trabaja en un proyecto denominado "Controlador adaptativo multifuncional de equipamiento de tráfico".

Su objetivo es el diseño y desarrollo de un sistema de control industrial completo para regulación de cruces semafóricos con la finalidad de cubrir una amplia gama de situaciones y problemática de regulación de tráfico, en las cuales los algoritmos de control convencionales son claramente insuficientes y donde es necesario la aplicación de técnicas de control inteligentes. En este proyecto se contemplan todas las acciones para la obtención de un sistema directamente instalable en la vía pública. Este objetivo específico se encuadra dentro del objetivo más general de disponer de un equipo con la arquitectura adecuada para servir de plataforma de toda la gama de controladores que se usan en los diferentes sistemas de regulación de tráfico, tanto urbanos como interurbanos, cubriendo la demanda actual de las salas de control en cuanto a homogeneizar este tipo de dispositivos. El sistema propuesto en este proyecto tiene una serie de características tecnológicas innovadoras que lo hacen único dentro de los productos existentes en el mercado de este sector, permitiendo a la empresa colaboradora asentarse en el mercado de la regulación urbana e introducirse en el sector del control interurbano, claramente en alza, con una tecnología propia de la que ahora carece.

El Grupo de la Universidad Carlos III, de Madrid, que procedía en

su mayoría de la UPM, desarrolló en el período 1994-96 un proyecto BRI-TE titulado:

*Powerful Systems for Identification and Control of Highly Non Linear Processes Using Neural Networks (PSYCHO)* cuyo objetivo es la Mejora de la seguridad, calidad y rapidez en procesos y plantas no lineales y el desarrollo de nuevos esquemas avanzados de identificación y control, con mayor estabilidad y robustez.

Participan, también, la Universidad de Gales (Reino Unido), la Universidad de Valladolid y RIKS (Holanda).

Los procesos químicos y bioquímicos presentan dinámicas fuertemente no lineales así como parámetros variables en el tiempo. La forma tradicional de controlar un sistema se basa en el modelado de su dinámica a través de la función de transferencia, lo que no garantiza un control seguro de este tipo de procesos. Un estudio realizado sobre historiales de accidentes demostró que las unidades de proceso de tipo "batch" presentan una siniestralidad mucho mayor (el 57 % de los casos) que las plantas de procesos continuos (11% de los casos). También se encuentran problemas económicos: los procesos "batch" se utilizan para producir un gran número de productos en pequeñas cantidades, con lo cual no resulta económicamente rentable realizar un estudio a fondo del comportamiento dinámico de los mismos. Las consecuencias inmediatas son: altos costes, importante retardo entre el estudio de laboratorio y la producción industrial, necesidad de controladores humanos, etc.

Los objetivos industriales del presente proyecto fueron la mejora de la seguridad, calidad y velocidad de los procesos y sistemas no lineales. Se desarrollaron nuevos esquemas para la identificación y el control con mayor estabilidad y robustez:

- Redes neuronales capaces de realizar la identificación de complejos sistemas no lineales.

- Controladores neuronales adaptativos que, entrenados en el laboratorio con reactores experimentales, son capaces de generalizar sus habilidades a las instalaciones reales.

Estos controladores están orientados principalmente a aplicaciones industriales, especialmente a las propuestas por los socios industriales del proyecto.

El Grupo de la Universidad Nacional de Educación a Distancia ha trabajado, entre otros, en los siguientes proyectos:

- Herramienta Total Integrada para la Optimización, basada en control predictivo fundado en modelos (1994-96). Proyecto ESPRIT 7510 Plan de Acción PAGE-PC025. Participaron también el Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática de la UVA, Initec, Central de Procesos Informáticos, Sociedad General Azucarera Española.

- Control robusto e inteligente de buques de alta velocidad en el período 1997-2000.

Hay Grupos de investigación trabajando en Control Inteligente en la práctica totalidad de las Universidades que imparten titulación de Ingeniería Industrial: Valladolid, Asturias, Cantabria, Cartagena, Elche, etc.

## 5. CONCLUSIONES

Las lecciones aprendidas después de más de una década de trabajos son:

- El Control Inteligente es una ayuda a la resolución de problemas que no tienen solución por otras técnicas.

- Ninguna de las técnicas (redes neuronales, lógica borrosa, etc.) son en sí mismas la herramienta universal; cada una se adapta mejor a determinados tipos de problemas. La combinación de técnicas multiplica la calidad de los resultados.

- Las aplicaciones son muy variadas y muchas de las dificultades actuales de control que tiene la industria nacional son abordables con garantía, porque la mayoría de las técnicas están consolidadas. ■