





Libro Blanco del Control Automático













Libro Blanco del Control Automático







Libro Blanco del Control Automático.

Edita: Comité Español de Automática (CEA).

1.ª edición.

© CEA, 2009

ISBN: 978-84-692-5966-5 Depósito legal: BI-964-09 Imprime: Grafo, S.A.

Índice

	Indice	5
	Resumen ejecutivo	7
1.	Introducción	15
	1.1. Objetivos del libro blanco	20
	1.2. Metodología y estructura del documento	23
2.	El control automático	27
	2.1. La realimentación	32
	2.2. Etapas de diseño de un sistema de control	35
	2.3. Beneficios del control automático	37
	2.4. La comunidad del control automático	41
	2.5. El ingeniero de control automático	43
	2.6. El control automático y las nuevas tecnologías	49
3.	Ejemplos de aplicación del control automático	55
	3.1. Transporte	58
	3.2. Robótica y mecatrónica	62
	3.3. Grandes instalaciones	65
	3.4. Control de redes y sobre redes de comunicación	69
	3.5. Microsistemas, sistemas moleculares y sistemas cuánticos	71
	3.6. Economía y econometría	75
4.	Situación de la industria española respecto al control automático	77
	4.1. El control automático en los sectores de tecnología alta	80
	4.2. Control automático y productos de alta tecnología	84
	4.3. Importancia del control automático para la empresa	87
	4.4. Situación actual del control en la industria española	88
	4.5. Análisis de la situación	93
5.	Análisis de la formación en control automático	99
	5.1. En el contexto español	102
	5.2. Relación entre el mundo académico y la industria	114
	5.3. En el contexto internacional	115

6.	Análisis de la I+D+i en control automático	121
	6.1. En el contexto internacional	123
	6.2. En el contexto español	133
	6.3. Relación entre el mundo académico y la industria	140
7.	Propuestas estratégicas para el futuro	149
	7.1. Campos estratégicos del control automático	152
	7.2. Recomendaciones estratégicas sobre el sector industrial	155
	7.3. Recomendaciones estratégicas sobre la formación	160
	7.4. Recomendaciones estratégicas sobre la I+D+i	163
8.	Bibliografía	167
9.	Sitios de Internet	171
10.	Anexos	173
	Anexo A. Campos y materias del control automático	175
	Anexo B. Algunos datos sobre formación en control automático en España	179
	Anexo C. Grupos de investigación españoles en control automático	181
	Anexo D. Datos utilizados para el análisis de las universidades	187
	D.1. Relación de universidades analizadas	187
	D.2. Resultados del análisis	188
	Anexo E. Principales revistas internacionales de control automático	193
	Anexo F. Breve reseña histórica	195
	F.1. El periodo inicial	195
	F.2. El periodo moderno y de la diversificación	197
	F.3. El control automático hoy	201
11.	Autores y colaboradores	203

Anexos publicados en http://www.ceautomatica.es/w3grupos/ingcontrol/

Anexo Web 1. Análisis de los principales congresos de control automático.

Anexo Web 2. Análisis de las principales revistas de control automático.

Anexo Web 3. Distribución de la investigación de las materias en los distintos campos IFAC en las universidades analizadas.

Resumen ejecutivo

Objetivo

Este libro blanco tiene por objetivo revisar el estado actual de la teoría y práctica del control automático en España, analizar su relevancia en el contexto de la formación universitaria y de la implantación industrial y estudiar las posibles acciones que, en el entorno de cambio que supone el Espacio Europeo de Educación Superior y el avance tecnológico, se deben tomar para situar este campo en un nivel equiparable al de nuestro entorno europeo.

Metodología y proceso seguido

Para acometer este estudio, se ha aprovechado la infraestructura que en todo el Estado Español tiene la Asociación «Comité Español de la Automática» (CEA) a través de sus cerca de 400 miembros repartidos por toda la geografía española, fundamentalmente en centros universitarios y de investigación. Se ha creado un grupo de trabajo constituido por 13 miembros de la citada asociación que, a través de sus respectivas áreas de trabajo, contacto e información, han recopilado y analizado datos y conceptos relacionados con el control automático, su desarrollo en España y su relación con países de nuestro entorno.

La metodología que se ha seguido tiene una fase de análisis y otra de síntesis. Inicialmente se describen los conceptos básicos, para situar el marco de trabajo: qué es el control automático y cuál es su relación con las nuevas tecnologías. Se analiza dónde se encuentra, cuáles son los beneficios y los requerimientos para su implementación. Se presenta la realidad del control automático a través de una serie de ejemplos significativos y la situación de la industria española desde la perspectiva del control automático. Resultado de este análisis son los puntos fuertes y débiles del control automático en España. En la parte de síntesis, se proponen líneas de actuación estratégicas para el control automático a medio y largo plazo y se estudian también cuestiones tan importantes como la formación y la situación de la I+D+i y del sector industrial en el campo.

Un breve resumen del contenido del documento es el siguiente:

1. Introducción

Donde se sitúa el control automático como una tecnología básica, oculta por muchas otras tecnologías, pero jugando un papel clave en la consecución de los avances tecnológicos de los últimos años; se plantean y justifican los objetivos que se pretende alcanzar con este libro:

- 1. Ampliar y clarificar el conocimiento que la sociedad tiene de la ingeniería de control (capítulos 2 y 3).
- 2. Aproximar el mundo académico (incluyendo centros tecnológicos) e industrial: ¿qué demandan las empresas? ¿qué se puede ofrecer? ¿cómo hay que reorientar, si es el caso, la formación de los ingenieros en control? (capítulos 5 y 7).
- 3. Proponer áreas prioritarias de investigación para el medio plazo ¿qué oportunidades tecnológicas hay en un futuro próximo y qué retos se presentan? (capítulos 6 y 7).
- 4. Remarcar el carácter aplicado y emergente del control automático, incluyendo estudios sobre qué demanda la industria española y qué oportunidades tecnológicas hay (capítulos 4 y 7).

Se destaca el papel crucial del control automático en numerosos sistemas en los que, una mirada superficial, no detectaría fácilmente la participación indispensable de esta tecnología. También trata de situar la diferencia entre la tecnología de soporte de una aplicación y la tecnología que controla el comportamiento de dicha aplicación sintetizando esta diferencia en la siguiente comparación: el control automático es a la electrónica lo que la inteligencia es al cerebro.

Además se explica la necesidad de la realimentación en muchos sistemas de control –comparación de la consigna con el valor real y modificación de la señal de mando para reducir la diferencia entre ambas– así cómo las etapas del diseño de un sistema de control. A partir de esta explicación se van presentando muchas de las áreas de estudio dentro del campo del control automático y se destacan los beneficios que se pueden obtener de la aplicación del control automático.

También se expone cómo los desarrollos en computación digital y en comunicaciones han potenciado y extendido la aplicación del control automático (la triple C) a nuevas capacidades y funcionalidades, algunas todavía inimaginables, y se explicitan algunos ejemplos ilustrativos.

Finalmente se hace una panorámica de las principales organizaciones que aglutinan a la comunidad de los especialistas en control automático y se presentan los diferentes perfiles de profesionales que trabajan en este campo.

2. Ejemplos de aplicaciones del control automático

En este capítulo se describen someramente algunas de las grandes áreas científicas, tecnológicas o industriales en cuyo desarrollo el control automático desempeña actualmente un papel protagonista esencial. Con ello se trata de ilustrar el carácter horizontal y ubicuo de la automática y su importancia e impacto real en la vida cotidiana.

Se incluyen principalmente aplicaciones consolidadas sobre las que el control automático ha tenido una influencia larga y contrastable, pero también se tratan algunos ámbitos menos clásicos en cuyo desarrollo los principios del control automático realimentado apenas han comenzado a aparecer hasta tiempos relativamente recientes, pero a los que se estima podría contribuir decisivamente en el futuro. Agrupadas por grandes áreas o sectores, se describen aplicaciones del control automático en:

- Transporte: Sectores de automoción, aeronáutico, aeroespacial, ferroviario, marítimo.
- Robótica y mecatrónica: Manipuladores, máquina-herramienta, electromecánica de precisión, robots móviles e inteligentes.
- Grandes instalaciones: Plantas de producción industrial, centrales eléctricas, térmicas, nucleares, grandes laboratorios científicos.
- Control en red y sobre redes de comunicación: Control sobre redes de datos, control de redes de agua, recursos o alimentación energética.
- Microsistemas, sistemas moleculares y sistemas cuánticos: MEMS, control de dinámica molecular y biomoléculas.
- Economía y econometría: Modelos económicos realimentados, predicción identificación y control de variables económicas.

3. Situación de la industria española respecto al control automático

Se establece la importancia del control automático para las empresas del sector industrial en procesos; la relación entre innovación, empresas de alta tecnología y control automático y los beneficios que la aplicación del control automático puede aportar a las empresas. Así mismo se trata de explicitar la relación entre los productos de alta tecnología y el control automático.

A partir de estadísticas oficiales se presenta el peso del control automático en el desarrollo económico e industrial en España y se extiende el análisis para comparar la situación en España con respecto a la de otros países de referencia, en particular, de la Unión Europea. Dado que no se dispone de estadísticas oficiales directamente relativas al control automático, se ha considerado pertinente valo-

rar su importancia en los sectores de tecnología alta (empresas de tecnología alta) y en los productos considerados de tecnología alta (que incorporan tecnología alta).

4. Análisis de la formación en control automático

Para analizar el desarrollo del control automático, de sus aplicaciones y de su evolución, es imprescindible tener en cuenta un aspecto clave: la formación de profesionales en control automático. El actual contexto europeo, y el español en particular, con la introducción de los nuevos grados y la homologación de las titulaciones dan una especial importancia y actualidad a este capítulo.

En este capítulo se hace una detallada presentación del presente de la formación en control automático: desde las enseñanzas preuniversitarias y de formación profesional, hasta la formación de postgrado y continua, así como de las demandas del sector industrial en este campo. El análisis se centra en la realidad española pero también tiene en cuenta el contexto internacional de la formación relacionada con el control.

5. Análisis de la I+D+i en control automático

Para abordar este análisis a partir de datos objetivos y contrastables se hace una aproximación utilizando tres indicadores: 1) Análisis de los principales congresos internacionales de control automático. 2) Análisis de los trabajos publicados en revistas relevantes en el campo del control automático. 3) Líneas de investigación en control de universidades del índice ARWU.

En el capítulo se presentan los datos recogidos sobre estos indicadores, resultado de un trabajo importante de recopilación. El análisis prospectivo de estos indicadores permite establecer pautas de cómo se está configurando en estos momentos la investigación y cuáles son los campos emergentes hacia los cuales la comunidad investigadora está dirigiendo su atención prioritaria.

Se presenta el análisis realizado sobre el contexto internacional y sobre el nacional para, de este modo, poder posicionar nuestra realidad en I+D+i en control automático con respecto al contexto internacional. También se realiza una reflexión sobre la labor de I+D+i en el sector industrial y su relación con el mundo académico.

6. Propuestas estratégicas para el futuro

En este capítulo se realiza la labor de síntesis del análisis realizado. En él se proponen las líneas estratégicas de actuación para el control automático en el sector industrial, en formación y en I+D+i.

Resultados

Los principales resultados se presentan con la estructura típica en este tipo de análisis:

- a) Puntos débiles (Debilidades);
- b) Peligros (Amenazas);
- c) Puntos fuertes (Fortalezas);
- d) Oportunidades (a corto plazo).

A su vez, estos aspectos se sintetizan para tres áreas de trabajo:

- 1) Sector industrial.
- 2) Formación universitaria y profesional.
- 3) I+D+i.

En resumen, estos resultados son:

1) Sector Industrial

Debilidades	 Los sistemas que se instalan actualmente para ejecutar el control son de importación y producidos por compañías multinacionales. Falta de especialistas en control automático (CA) en las Empresas. Escasa colaboración del sector industrial con los sectores formativos y de I+D+i. Las multinacionales que producen en España generan la I+D+i fuera. Muchas empresas españolas no son conscientes de que su supervivencia a largo plazo depende de su capacidad de innovar.
Amenazas	 Globalización, en productos y estrategias: Que el sector industrial traslade fuera toda la producción antes de haber empezado a buscar dentro la posibilidad de innovar. Inclusión del control en productos elaborados (empotrados) por industrias multinacionales específicas. No invertir en mejora de procesos y productos. Dependencia exterior de las soluciones «llave en mano».
Fortalezas	 El control automático está presente prácticamente en todos los sectores industriales y de servicios. El control automático introduce mejoras económicas y de condiciones de trabajo en el proceso productivo. Una mayor automatización es necesaria para mantener la competitividad.
Oportunidades	 Formar especialistas en los distintos niveles formativos que puedan atender las necesidades de cada sector. Posibilidad de desarrollo local de soluciones «ad hoc». Establecimiento de relaciones directas entre asociaciones de control, como CEA, y de sectores de producción.

Los sistemas que se instalan actualmente nara ejecutar el control son de

2) Formación

Debilidades	 Falta de reconocimiento de los especialistas en CA. Falta de adecuación de la formación a las necesidades industriales y de I+D+i. Falta de interdisciplinariedad en la formación de algunos ingenieros de CA. Necesidad de una mayor formación experimental.
Amenazas	 Orientar la formación en una sola dirección: investigación o profesional. Desconectar la formación de las necesidades industriales, centrándola en aspectos puramente académicos. Desconexión en la formación especializada en CA entre los distintos niveles educativos.
Fortalezas	 Formación de especialistas a distintos niveles: Formación Profesional, Ingeniería Técnica, Ingeniería Superior, Doctorado. Creación de profesionales Máster en CA. Existencia de numerosos centros de formación con especialización en CA. Plantel de docentes e investigadores de reconocido prestigio nacional e internacional.
Oportunidades	 Reestructuración de las enseñanzas adaptadas al Espacio Europeo de Educación Superior, teniendo en cuenta la formación en países de nuestro entorno. Posibilidad de crear Másteres de tipo profesional y de investigación. Formación especializada en diversos campos del CA, en función de la demanda local de los centros de formación.

3) I+D+i

Debilidades	 Falta de Inversión pública y practica ausencia de Inversión privada. Escasa transferencia de tecnología. Poca comunicación entre los productores de investigación y la parte de la sociedad que ha de innovar.
Amenazas	 Seguir como estamos. Esperar la ayuda del exterior. Convertir los centros de investigación en empresas de ingeniería.
Fortalezas	Existen numerosos y prestigiosos centros de I+D+i en CA.Buena red de conocimiento e intercambios entre centros.
Oportunidades	 Participación en programas europeos. Compromiso y exigencia de las empresas en el apoyo a proyectos de I+D+i. Introducción en los mecanismos de valoración de la labor de I+D+i de los investigadores, mayor relevancia para los aspectos de innovación.

Falta de inversión nública y práctica ausencia de inversión privada

Acciones que se sugieren

Se proponen acciones que afectan a los diferentes actores sociales involucrados, con recomendaciones de carácter general y particular referidas a los aspectos de control automático. Es imprescindible para los países crear y disponer de las infraestructuras de sopor-

te necesarias para sacar el máximo aprovechamiento de las nuevas aplicaciones y productos que van a ofrecer estas nuevas tecnologías.

Se propone una serie de recomendaciones:

- a) Proponer a las Universidades, en especial aquellas con mayor componente tecnológico:
 - Organizar charlas de difusión de la presencia del control automático.
 - Potenciar la creación de títulos oficiales de Máster de carácter profesional.
 - Potenciar la creación de títulos oficiales de Máster orientados a la investigación.
 - Potenciar la creación de programas de doctorado y la realización de tesis doctorales de carácter aplicado en colaboración con empresas que les permita tomar conciencia de los mecanismos y ventajas de I+D+i.
 - Diseñar acuerdos internacionales de colaboración.
 - Reflejar en los planes de estudio la trascendencia de los temas relacionados con el control automático.
- b) Proponer a la Administración Central y Autonómica:
 - Aumentar el apoyo a la investigación basica.
 - Promover programas que permitan atraer científicos de relevancia.
 - Apoyar proyectos empresariales de calidad.
 - Promover las relaciones entre el mundo académico e industrial.
 - Apoyar la excelencia de la labor investigadora.
 - Focalizar las líneas prioritarias de investigación.
 - Ampliar los sistemas de almacenamiento e intercambio del conocimiento.
 - Coordinar las ayudas nacionales y de las comunidades autónomas.
 - Diseñar y llevar a cabo las estrategias necesarias para que España sea un polo de atracción para centros de investigación y científicos de todo el mundo.
 - Hacer llegar a las empresas propuestas para:
 - → Valorar los beneficios de la innovación en general y el CA en particular.
 - → Potenciar mecanismos para la innovación, con la incorporación de técnicos y doctores formados en centros de investigación.
 - → Invertir en I+D en áreas para el desarrollo de nuevos productos y servicios.
 - → Modernizar sus equipos e instalaciones de producción para garantizar su eficiencia y competetividad en un mercado global.
 - → Invertir en la formación de técnicos y científicos en estas áreas.
 - → Disponer de centros productores de investigación y desarrollo o la potenciación de los ya existentes, en particular las Universidades.

1 Introducción



Bomba de insulina: el controlador decide la cantidad de insulina a suministrar midiendo el nivel de glucosa.

El control automático, ha venido denominándose en los últimos años como la tecnología oculta que nos encontramos por todas partes, seguramente a partir de la expresión acuñada por el Prof. Karl J. Åström que la describió como la *Hidden technology*. El significado de esta denominación es claro: los sistemas de control, presentes en la mayoría de aplicaciones científicas y tecnológicas, realizan su función mejorando las prestaciones del sistema que controlan, sin tener una visibilidad en tanto en cuanto el comportamiento es el esperado. Solamente queda puesta de manifiesto su presencia si se produce un fallo, si el sistema se queda «sin control».

En otro sentido se ha manifestado recientemente el nuevo Presidente de IFAC ¹, el Prof. Alberto Isidori que ha comenzado a denominarla como una *manifest technology* o



Máquina de vapor.

¹ IFAC (International Federation of Automatic Control), es una federación multinacional de Organizaciones Miembros Nacionales (NMOs) creada en Septiembre de 1957, donde cada uno de ellas representa a las asociaciones científicas y de ingeniería que en sus propios países se ocupan de los temas del control automático (http://www.ifac-control.org/). En España esa representación la ostenta CEA (Comité Español de Automática) (http://www.ceautomatica.es/).

«tecnología revelación» (emergente). Esta descripción trata de poner de manifiesto que los sistemas de control son imprescindibles para asegurar un funcionamiento correcto de cualquier sistema creado por el ser humano. También es esencial en los sistemas naturales, biológicos, ambientales, sociales, etc. pero en estos casos, los sistemas de control se encuentran totalmente imbricados con los procesos básicos y, muchas veces, es difícil deslindar qué es proceso controlado y qué es sistema de control.

El control automático, como disciplina básica, tiene entre sus pilares el análisis y modificación del comportamiento dinámico de cualquier tipo de sistemas, el análisis y modificación de su propia estructura y el análisis y adecuación que la presencia de la realimentación introduce en este comportamiento. Esto ha determinado que su estudio se haya abordado desde distintas perspectivas y con las herramientas propias de cada disciplina, sin establecer a priori abstracciones simplificadoras que dan una estructura y cuerpo homogéneo a esta tecnología. Así, el estudio de fenómenos espaciales, fenómenos naturales o artificiales, hasta el de los microorganismos celulares y moleculares, obedece a unas pautas comunes que permiten un tratamiento unificado.

Bien es cierto que la diversidad de aplicaciones hace difícil el reconocimiento de esta similitud desde ópticas particulares. A este respecto, ha sido paradigmático el distinto enfoque dado a los problemas de control automático en la industria de procesos (con dinámicas, en general, lentas) y la electrónica y electromecánica (con fenómenos de dinámica rápida). Como también han sido muy distintas las herramientas utilizadas en el estudio de los sistemas con relés y el de algunos fenómenos biológicos, con una indudable similitud.

La labor de la ingeniería de control debe estar presente desde el mismo principio de proyecto de cualquier sistema, dentro de un método de trabajo simultáneo y concurrente con las diferentes ingenierías, proporcionando un carácter de optimización global y de mejora de la controlabilidad del sistema desde el comienzo, rediseñando incluso, de común acuerdo con otros expertos, las partes mecánicas, aeronáuticas, químicas o eléctricas del proyecto.

Esta visión de la ingeniería de control ha sido clave en los avances tecnológicos de los últimos años. Dicho en pocas palabras: la ingeniería de control debe ser capaz de trabajar con diversas ingenierías de modo concurrente en el diseño óptimo de nuevos sistemas y productos, (además del diseño del propio sistema de control, sus componentes y ajuste final). Actualmente, la inmensa mayoría de sistemas de control tienen una implementación digital que se basa en una unidad central (que puede ser distribuida) de cálculo. Ello ha permitido que en el mismo dispositivo se incluyan no solamente las acciones de control o regulación propiamente dichas sino también una serie de tareas relativas, entre otras, a la seguridad, tratamiento y almacenamiento de datos, transferencia entre modos de operación, supervisión y detección de fallos.

Cada una de estas tareas requiere de un tratamiento adecuado y deben ser coordinadas entre sí. Todas ellas tienen una implementación sencilla, consistiendo en un reducido número de líneas de código pero, en este caso, como en muchos otros, el hecho de que sea una pequeña parte de la aplicación no quiere decir que no sea fundamental. Por poner un ejemplo familiar a todas las ingenierías, una máquina de vapor tiene una extraordinaria complicación y requiere de expertos para su diseño y realización pero no sería operativa si no tuviera un regulador de Watt que permita su funcionamiento estable. El avance en muchas disciplinas, y la aeronáutica es un ejemplo paradigmático, ha sido posible por la introducción de los sistemas de control que han permitido hacer operativos sistemas inherentemente inestables.

Todo ello hace muy conveniente la elaboración de un estudio recopilatorio en el que se pongan de manifiesto las distintas alternativas del control automático, su implantación y enseñanza en España y sus perspectivas de desarrollo, así como las posibilidades de proporcionar una tecnología y unas herramientas versátiles y potentes para el estudio de la dinámica de los procesos naturales y artificiales.

Las preguntas genéricas a las que vamos a hacer frente en este estudio podrían resumirse en:

- 1. ¿Cuáles son los pilares del control automático? ¿qué es propio y común?, ¿qué es diferenciador?, ¿qué es «imprescindible» que todo profesional conozca?
- 2. ¿Qué conceptos son necesarios para obtener una perspectiva integradora, de funcionamiento global de un sistema, ya sea a partir de las propiedades de sus componentes o de las propias especificaciones de su funcionamiento integral?
- 3. ¿Qué conceptos se repiten en ingeniería química, mecánica, electrónica, aeronáutica, informática, genética, biología, físicas o químicas?, por mencionar unas básicas.
- 4. ¿Por qué es necesario formar profesionales en ingeniería de control?
- 5. ¿Cuál es la situación española actual: académica (docente e investigadora) e industrial?
- 6. ¿Cuáles son las perspectivas de futuro (áreas prioritarias de investigación, oportunidades tecnológicas, retos, etc.)?

Desde esta perspectiva los objetivos que persigue este estudio son:

- Ampliar y clarificar el conocimiento que la sociedad tiene de la ingeniería de control.
- 2. Aproximar el mundo académico (incluyendo centros tecnológicos) e industrial: ¿que demandan las empresas? ¿qué se puede ofrecer? ¿cómo hay que reorientar, si es el caso, la formación de los ingenieros en control?
- 3. Proponer áreas prioritarias de investigación para el medio plazo. ¿Qué oportunidades tecnológicas hay en un futuro próximo y qué retos se presentan?

4. Remarcar el carácter aplicado y emergente del control automático, incluyendo estudios sobre qué demanda la industria española y qué oportunidades tecnológicas hay.

1.1. Objetivos del libro blanco

El Comité Español de Automática (CEA) es una asociación profesional sin ánimo de lucro que agrupa en su seno a la práctica totalidad del mundo académico e investigador relacionado con el control automático. Entre los fines de CEA se encuentra el de promover el estudio, aplicación y mejora de las técnicas de la automática mediante la publicación de informes y monografías que pongan de manifiesto la importancia cada vez más creciente que tiene su estudio e investigación para nuestro bienestar y desarrollo futuro. Estos informes independientes realizados desde la propia sociedad civil pueden ayudar al observatorio permanente del sistema español de ciencia-tecnología-sociedad en el proceso de toma de decisiones y en la planificación y programación de nuevas actuaciones donde el control automático está llamado a jugar un papel importante. Desde esta consideración inicial este «Libro blanco del control automático» se ha escrito con el objetivo de dar respuesta a las siguientes cuestiones:

1. ¿Qué es el control automático? El control automático ha emergido como una disciplina interesante y satisfactoria en un período de tiempo de apenas unos 60 años. El desarrollo del campo ha sido muy dinámico y motivador y se puede decir que es la primera disciplina técnica que trasciende las fronteras de las ingenierías tradicionales (mecánica, civil, eléctrica, química y nuclear). El control automático tal como se aborda en este estudio trata del uso de algoritmos y realimentación en los sistemas de ingeniería. En su forma más simple, un sistema de control automático es un dispositivo en el cual una cantidad medida se utiliza para modificar la con-



Ejemplo de fábrica automatizada: Línea de producción de una fábrica de queso

ducta de un sistema a través de cálculo y actuación. Desde esta perspectiva el control automático es una tecnología crítica y fundamental para el desarrollo de una sociedad cada vez más orientada hacia la información y el conocimiento como base para la toma de decisiones. Hay una tendencia general para que los sistemas de ingeniería se hagan cada vez más y más complejos. Hay muchos mecanismos que introducen complejidad; el tamaño y la interacción son dos factores a tener en cuenta.

2. ¿Qué problemas tiene planteados el control automático? Un cambio importante que se ha ido produciendo en la empresa y en la actividad económica en general es la mayor presencia de la automatización y del conocimiento en procesos y productos cada vez más complejos que se apoyan en el control automático, los computadores y las comunicaciones (la triple C). Hoy no se concibe una línea de producción sin un cierto grado de automatización y de manera creciente la operación de una empresa se basa en la gestión automatizada de información integrada en los diversos niveles que la constituyen. El control automático resulta crucial en la generación y transmisión de energía, en el control de procesos, en la fabricación de bienes y equipos, en la comunicación, en el transporte e incluso para el entretenimiento y el ocio. Ha sido un elemento clave en el diseño de equipos experimentales y en la instrumentación utilizada en las ciencias básicas. Resulta pues sorprendente el hecho de que apenas sea reconocido por la sociedad el valor crucial que esta tecnología tiene en sus actuales niveles de bienestar. Esta capacidad de operación silenciosa es lo que le ha valido la consideración de «tecnología oculta» En este sentido los sistemas de control automático se han convertido en el «talón de Aquiles» de muchos de nuestros sistemas. La destrucción o mal funcionamiento de un controlador puede producir consecuencias catastróficas en el funcionamiento del proceso al que se encuentra conectado. La reciente aparición de nuevos sistemas integrados de medida, comunicación y cálculo distribuido ha comenzado ya a crear un entorno en el cual se tiene acceso a cantidades enormes de datos con capacidad de procesamiento y comunicación que eran inimaginables hace apenas 20 años. Esto va a tener como consecuencia inmediata un efecto profundo sobre las aplicaciones científicas, comerciales y militares, especialmente cuando los sistemas de software comiencen a interaccionar con sistemas físicos de manera cada vez más integrada. De forma natural pues el control automático va a ser un elemento esencial en la construcción de tales sistemas interconectados, que deben proporcionar un funcionamiento con elevadas prestaciones, capacidades de reconfiguración y gran fiabilidad frente a la presencia de incertidumbres y perturbaciones. Una tendencia paralela será la generalización del uso del control automático en sistemas de muy gran escala, tales como la logística y las cadenas de suministro de las empresas. Estos sistemas incorporarán la toma de decisiones de sistemas muy grandes y heterogéneos donde se requieren nuevos protocolos para determinar la gestión de los recursos a la luz de las incertidumbres que su funcionamiento futuro plantea. Aunque los modelos que se dispongan serán esenciales para analizar y diseñar tales sistemas, estos modelos (y los subsiguientes mecanismos de control) deben ser escalables a sistemas muy grandes, con millones de elementos que son en sí mismos tan complicados como los sistemas que actualmente se controlan de forma rutinaria.

- 3. ¿Cuál debe ser el perfil de los profesionales del control automático? El abanico de oportunidades que ofrece el control automático se ha expandido enormemente y ha generado nuevos retos que deben abordarse con determinación en este período de adaptación de la docencia en la universidad española al nuevo Espacio Europeo de Educación Superior. El perfil de un profesional del control automático implica unas competencias, no cubiertas por otras profesiones, en los siguientes campos: Instrumentación, Automatización (PLC, robots, máquinas, etc.), Inspección industrial, Control de procesos, Informática industrial, Integración de sistemas y lo que es más importante una visión sistémica de los problemas que es consustancial a esta disciplina. Sus competencias no estarían orientadas a desarrollar componentes electrónicos de automatización, sino a integrar y comunicar equipos e instrumentos introduciendo la inteligencia necesaria (control) en sistemas, procesos y productos para dotarles de la funcionalidad adecuada. Estas competencias les permitirían a los que obtengan este título de grado abordar funciones profesionales de: diseño, instalación, mantenimiento y operación de sistemas automatizados, instrumentistas, técnicos de salas de control, automatización de máquinas, procesos y sistemas, implantación y gestión de sistemas industriales informatizados, integradores de sistemas, entornos de entrenamiento basados en simulación de sistemas, desarrollo, implantación y mantenimiento de sistemas de inspección automatizada, Desarrollo, implantación y mantenimiento de sistemas de ayuda a la toma de decisiones en producción, diseño e implantación de sistemas integrados, ingenierías de automatización y empresas suministradoras de equipos y sistemas, por nombrar sólo aquellas que parecen como más significativas. Un punto importante a señalar es que las competencias expuestas tenderán a ser cada vez más demandadas en el futuro. Las nuevas tendencias en educación superior respecto a este ámbito, definen al ingeniero de control automático como aquel ingeniero capaz de integrar los diferentes elementos de un sistema (mecánico, eléctrico, informático, etc.) para aportar soluciones integradas de automatización y control de procesos.
- 4. ¿Qué acciones estratégicas del control automático son necesarias? La colaboración entre el mundo académico e industrial en actividades de I+D+i es uno de los componentes esenciales dentro de las políticas de desarrollo tecnológico ya que se potencian la creación de empresas innovadoras, se incrementan sus capacidades tecnológicas y competitivas y en definitiva se favorece el desarrollo económico de nuestra sociedad. La competitividad de un país requiere que se tenga capacidad de generar conocimiento y de promover el desarrollo de las innovaciones tecnológicas que se produzcan con el objetivo de reducir costes mediante la utilización de nuevos procesos y/o productos. Es un hecho constatado que los países más desarrollados industrialmente, los más productivos y competitivos, son también aquellos

que lideran las inversiones en modernización e innovación tecnológica. El sistema nacional de innovación, como reconocen los gobiernos de los países de la OCDE es el principal motor de la economía, y en general en España, y muy particularmente en el campo del control automático, la todavía escasa tradición de colaboración entre las empresas, la universidad y los centros de investigación, supone un importante lastre que debemos de superar. Una de las consecuencias de la aún baja inversión en I+D+i que hay en España, especialmente significativa en el sector empresarial, más que en el público, es que nuestros índices de competitividad son bajos. Existe una relación directa entre la generación de conocimiento y la innovación. Es la generación del conocimiento la que, una vez aplicada industrial o comercialmente permite generar una innovación, entendida como novedad tecnológica en productos o procesos. Resulta pues evidente que es preciso llevar a cabo un estudio estratégico de la situación competitiva del control automático tanto a nivel nacional como internacional analizando las características especialmente singulares que plantea la tecnología del control con la finalidad de determinar sus propias debilidades y fortalezas y como consecuencia de ello analizar las amenazas y oportunidades que se presentan en el entorno de la misma. Un objetivo explicito será pues definir una hoja de ruta con un horizonte de medio y largo plazo que permita identificar aquellos nichos de oportunidad y líneas estratégicas de actuación donde debemos de concentrar nuestro esfuerzo de I+D+i en control automático.

1.2. Metodología y estructura del documento

El «Libro Blanco del Control Automático» es una iniciativa auspiciada por el Grupo Temático de «Ingeniería del Control» del Comité Español de Automática (CEA) que centra su interés básico en la automatización y el control automático de sistemas complejos, sin intervención humana directa. Este libro sigue un enfoque metodológico y mantiene una estructuración similar a la monografía titulada «Libro Blanco de la Robótica» elaborada por el Grupo Temático de «Robótica» de CEA. También han participado en su desarrollo los siguientes Grupos Temáticos de CEA: «Control Inteligente», «Sistemas en tiempo real» y «Modelado y Simulación». Todos estos grupos están integrados fundamentalmente, por los investigadores de Universidades, CSIC y Centros Tecnológicos de todo el territorio español que tienen como objeto de su estudio e investigación problemas, tanto teóricos como prácticos, donde el control automático juega un papel central en su solución.

La metodología que se ha seguido tiene una fase de análisis y otra de síntesis. En la primera, se presenta la realidad del control automático a través de una serie de ejemplos

significativos y la situación de la industria española desde la perspectiva del control automático. En la parte de síntesis, se proponen líneas de actuación estratégicas para el control automático a largo plazo y se estudian también cuestiones tan importantes como la formación y la situación de la I+D+i en el campo.

El libro se ha escrito en un estilo claro y directo evitando los tecnicismos y proporcionando ideas, sugerencias y reflexiones que permitan al lector interesado encontrar respuestas a los interrogantes que se formulan. Se ha analizado con sumo cuidado los destinatarios potenciales de este Libro Blanco, definiendo con claridad a quienes va dirigido. Pueden distinguirse al menos tres perfiles que se han tenido presentes desde el primer momento: 1) Las empresas y la sociedad en general. 2) Los promotores y dinamizadores de la I+D+i, especialmente las distintas administraciones públicas y el capital procedente de la iniciativa privada y 3) Los gestores y responsables de la I+D+i (universidades, CSIC y centros tecnológicos). Una relación equilibrada entre todos ellos es de gran importancia para unos buenos resultados de la I+D+i en su conjunto. El Libro Blanco sugiere claves y pautas a todos ellos siempre desde la perspectiva de la propia I+D+i.

Para su desarrollo el libro se ha estructurado en siete capítulos además de un resumen ejecutivo. En este primer capítulo se formulan las cuestiones a las que trata de dar respuesta este libro así como cuales son los objetivos que se plantean. El capítulo 2 explica en un lenguaje coloquial qué es y para qué sirve el control automático, qué beneficios reporta su utilización así como la importancia que tiene un ingeniero especialista en control automático en la solución de estos problemas. En el capítulo 3 se muestran un conjunto de ejemplos de aplicación donde el control automático juega un papel crucial. Sin ánimo de ser exhaustivos se examinan tecnologías y procesos de diferentes sectores así como campos científicos que muestran al lector el carácter horizontal y en cierta forma ubicuo de la automática. La idea es transmitir su importancia e impacto real en nuestra vida diaria. El capítulo 4 analiza cual es la situación de la industria española en relación con el control automático. Se trata por una parte de ponderar el peso que tiene el control automático en el desarrollo económico e industrial de España y de otra poner de manifiesto su importancia socio económica. Se compara también nuestra situación real en el campo con respecto a la de otros países de referencia o del entorno. Los capítulos 5 y 6 tienen una estructura análoga; en el primero de ellos se efectúa un estudio de las necesidades de formación en control automático tanto en el contexto español como internacional. El segundo se dedica al análisis de la I+D+i también desde ambas perspectivas nacional e internacional. Finalmente, en el capítulo 7 se formulan determinadas propuestas estratégicas para el sector industrial, las necesidades de formación y sobre hacia dónde debe orientarse una política de I+D+i en control automático de cara al futuro.

Al final del libro aparecen seis anexos que proporcionan una información más detallada de determinados aspectos del estudio que no se han incluido en el texto principal. Además, y con el fin de mantener el libro en una extensión razonable, se han incluido tres anexos adicionales en el sitio de internet http://www.ceautomatica.es/w3grupos/ingcontrol/. Estos anexos se referencian como Anexo Web 1 - Anexo Web 3.



Lector de CD

El control automático



Estación de control de una central térmica

Una situación con la que se encuentra frecuentemente un ingeniero de control es con la necesidad de explicar a qué se dedica. Sin embargo, esa necesidad no suele ser tal si alguien dice que es, por ejemplo, matemático, físico, ingeniero informático, químico o eléctrico.

El control, en general, es un concepto que está presente en prácticamente la totalidad de las situaciones cotidianas, sin que se repare en su importancia. Sin embargo, son muy llamativas las expresiones «algo o alguien está descontrolado o fuera de control», que tienen una connotación de algo indeseable o incluso de alarma. Para entender tanto la trascendencia como la transversalidad del concepto de control, no hay más que reflexionar en las situaciones a las que se puede aplicar estas expresiones

El control automático es la rama de la ingeniería dedicada a que los sistemas funcionen de manera autónoma, permitiendo llevar a cabo, entre otras, tareas que un operador humano no es capaz de realizar. Sin esta rama de la ingeniería no sería posible disfrutar de muchas de las facilidades cotidianas ni sería posible el actual nivel de industrialización.

A modo de ejemplo, es bien conocido que en un sistema eléctrico (como la red nacional de electricidad), la energía eléctrica generada debe ser igual en todo momento a la energía eléctrica demandada o consumida. En caso contrario los generadores se embalarían² o se frenarían, dando lugar a que la frecuencia de la red eléctrica no sea igual a 50 hercios y, probablemente, al colapso final del sistema. Esto obliga a que cada vez que encendemos, por ejemplo, un aparato de aire acondicionado o una simple bombilla, algún generador eléctrico debe incrementar la energía que produce. Por tanto, debe existir algún órgano que «ordene» este incremento. Debido a que el cambio en la energía generada debe ser prácticamente instantáneo, esta orden no la puede realizar un operador humano y es necesario acudir al control automático.

² Viene a colación una de las acepciones que el Diccionario de la Real Academia asigna a la palabra «embalar»: Hacer que adquiera gran velocidad un motor desprovisto de regulación automática, cuando se suprime la carga. Obsérvese la referencia a la «regulación automática» que, en éste contexto es sinónima de «control automático».

Al introducir un CD en un lector, se espera que la información contenida en él pueda ser extraída para ser tratada posteriormente por un computador o un equipo de música. Para poder acceder a dicha información es necesario gestionar la tensión de un motor eléctrico para situar una lente con mucha rapidez y precisión en una posición determinada. Obviamente, sería imposible para un operador humano realizar esta operación con tantas prestaciones, por lo que esto no sería posible sin un control automático.

El consumo de alimentos, como la leche envasada, con caducidad de varios meses es posible gracias a técnicas como la pasteurización. Esta técnica requiere elevar drásticamente pero de manera *controlada* la temperatura del alimento durante un breve periodo de tiempo para evitar una degradación del mismo. Para conseguirlo, es necesario actuar adecuadamente sobre mecanismos de aporte de calor para que la temperatura sea la prevista.



Proceso de pasteurización.

Estos son sólo algunos ejemplos concretos de cómo el control está presente en la vida cotidiana, de manera oculta, y del que sólo se es consciente cuando deja de funcionar adecuadamente: piénsese en lo que sucedería si fallase el sistema de control de potencia eléctrica generada. Lo más probable es que se viniera abajo todo el sistema eléctrico llegando al denominado *colapso de tensión*. Afortunadamente, los sistemas de control automático que nos rodean funcionan adecuadamente en la inmensa mayoría de los casos.

Controlar consiste, pues, en adoptar una serie de decisiones y actuar en consecuencia para conseguir unos objetivos. Cuando en estas decisiones participa el ser humano se habla de control manual, mientras que si el sistema «toma las decisiones» de control de forma autónoma se califica como control automático, modalidad que es el objeto de este libro blanco. Por ejemplo, si se quiere controlar la velocidad a la que se desplaza un coche, se podrá actuar sobre la cantidad de combustible que se inyecta al motor. En el caso de control manual esto se hace pisando el acelerador si se desea incrementar la velocidad o levantando el pie en caso de que se desee disminuir; el caso de control automático corresponde a los vehículos dotados de control de velocidad en los que el denominado ordenador de a bordo toma estas

decisiones. Otro ejemplo es el pilotaje de un avión: el control de rumbo y altitud deja de ser manual cuando se conecta el «piloto automático».

Existen sistemas que serían imposibles de controlar si no se realizara, al menos en parte, de manera automática. Por ejemplo, muchos de los aviones de combate modernos están diseñados para disponer de una gran maniobrabilidad. Sin embargo, este diseño implica que un piloto, por sí sólo, literalmente no podría ser capaz de manejar el avión. Algo similar sucede con el pilotaje de ciertos helicópteros. En este caso, si bien un piloto sí podría manejar la aeronave, la concentración necesaria para hacerlo sin ayuda de un control automático le imposibilitaría pilotar más que durante un corto periodo de tiempo.

Finalmente, también es de destacar los beneficios en términos de



Panel de mandos de un avión con piloto automático.



Robot quirúrgico.

precisión y velocidad de respuesta, por ejemplo, que se pueden alcanzar con un control automático, y que no es posible alcanzar con un control manual. Piénsese, por ejemplo, en lo que implica una intervención quirúrgica moderna de ojos para eliminar la miopía. Para ello, se ha de situar un láser (objetivo de control) utilizando un robot quirúrgico, cuyos movimientos han de ser controlados de manera muy precisa. En la publicidad de clínicas especializadas es común leer frases como: «El defecto de refracción queda corregido en unos segundos, con *excepcional precisión*, *fiabilidad* y *estabilidad*». Es imposible pensar en

realizar este tipo de afirmaciones sin el uso de un algoritmo de control automático adecuado, implementado en un computador, para poder llevar a cabo la intervención quirúrgica.

Para desarrollar un sistema de control automático se recurre a un algoritmo que se suele implementar en un sistema digital. No deja de ser curioso como con mucha frecuencia se confunde la electrónica con el control automático. El control automático se dedica al diseño de algoritmos que decidan por sí solos qué acciones realizar para conseguir unos objetivos, mientras que la electrónica hace las veces de soporte físico de ese algoritmo. En este sentido, se podría decir que el control automático es a la electrónica lo que la inteligencia es al cerebro.

No obstante, y a pesar de esta clara diferencia, si se realizara una encuesta preguntando por ejemplo cómo los coches actuales son capaces de mantener la velocidad sin la intervención del conductor, probablemente la respuesta mayoritaria sería que se debe a los sistemas electrónicos (el ordenador de a bordo) y no a los algoritmos que se han programado en él. Si bien es cierto que sin el ordenador sería mucho más complicado implementar estos algoritmos, es el algoritmo lo que dota al vehículo de una nueva prestación.

El lector interesado en comprender la importancia del control automático puede encontrar una introducción moderna escrita en un lenguaje muy asequible y con multitud de ejemplos en el reciente libro de Albertos y Mareels, 2009.

2.1. La realimentación

Un concepto clave en el control (ya sea manual o automático) es el de *realimentación*, que consiste en el uso de la medida de la variable a controlar para la toma de decisiones. En el caso del control de la velocidad del coche, el conocimiento de la velocidad instantánea del vehículo se utiliza para decidir si se debe pisar más el acelerador (cuando la velocidad del vehículo sea inferior a la deseada) o lo contrario. Obsérvese cómo para realizar la comparación entre la velocidad deseada y la real se necesita una medida de esta última, la cual se obtiene a partir del velocímetro del coche.

Mediante la realimentación se pueden conseguir objetivos que pueden parecer asombrosos o misteriosos para los no iniciados en la teoría del control. Por ejemplo, en 1934 H. Black aplicó la realimentación al amplificador electrónico, con lo que consiguió unas extraordinarias características de linealidad necesarias para poder conectar varios amplificadores en serie en largas conexiones de telefonía sin que se produjeran distorsiones. La linealidad del amplificador realimentado era muy superior a la que se podía conseguir con la tecnología existente en esa época en amplificadores sin realimentar. La realimentación introdujo mejoras significativas con un coste muy bajo.

Entre los múltiples motivos por los que es necesaria la realimentación para realizar un buen control caben destacar los siguientes:

Normalmente la toma de decisiones de las actuaciones a aplicar se basan en un modelo del sistema, el cual plasma el conocimiento del comportamiento del mismo ante distintas actuaciones. Sin embargo, por muy bueno que pueda llegar a ser un modelo, siempre existirán diferencias entre el comportamiento del sistema real y el predicho por el modelo. La realimentación permite corregir, en cierto grado, los errores del modelo, pudiendo así adoptar decisiones más acertadas para conseguir los objetivos.

Como ejemplo aclaratorio, supóngase que se tiene un objeto en las manos y que se lanza al aire con el objetivo de volver a cogerlo. Si el experimento se realiza con los ojos abiertos, es relativamente fácil atrapar el objeto otra vez. Sin embargo, si el experimento se realiza con los ojos cerrados, lo más probable es que el objeto caiga al suelo. La diferencia entre el primer y el segundo caso es la pérdida de la realimentación (visual, en este ejemplo) para poder decidir con precisión dónde colocar las manos a fin de conseguir el objetivo (volver a coger el objeto). Es de notar que es probable que en algún caso se esté a punto de conseguir el objetivo aún teniendo los ojos cerrados. Esto se debe a que el modelo que se tiene del movimiento del objeto en el aire (instintivamente implementado en el cerebro) es lo suficientemente preciso como para posicionar las manos de manera aproximada en el lugar adecuado. Sin embargo, sólo con la realimentación se conseguirá corregir las deficiencias del modelo, consiguiendo así recoger el objeto lanzado al aire.

En el caso del control de la velocidad del coche, éste no se realiza calculando a priori la cantidad de combustible a inyectar en el motor para conseguir una velocidad deseada con cierta precisión. Piénsese que, además de perturbaciones externas de las que se hablará más adelante, el sistema que se pretende controlar es tremendamente complejo y difícil de modelar. De hecho, el modelo debería ir variando con el tiempo para ajustarse a los cambios. Por ejemplo, el rendimiento del motor de explosión, el rozamiento de la transmisión, etc., son parámetros del vehículo que van variando a medida que éste envejece. Sin embargo, el uso de la realimentación permite decidir cómo corregir la cantidad de combustible inyectado basándose en la diferencia de la velocidad real y la deseada. Esto hace que el modelo que se usa para diseñar un controlador automático sea relativamente sencillo.

 Otro factor que hace imprescindible el uso de la realimentación para conseguir los objetivos precisos de control son las variaciones de variables externas que pueden afectar a dichos objetivos.

Piénsese, por ejemplo, en el control de temperatura de una habitación mediante una bomba de calor (un ejemplo similar es el control de temperatura de un horno de cocción de cerámica). Aunque se dispusiera de un buen modelo para decidir

qué potencia calorífica se debería aportar para conseguir una temperatura deseada, existen variables, como la temperatura exterior, la posible apertura de ventanas, el número de personas en su interior, la iluminación utilizada, etc., que pueden afectar a la temperatura real de la habitación, y que no suelen ser contempladas por los modelos. El uso de la realimentación, utilizando la medida de la temperatura para la decisión de la potencia calorífica a aportar, permitirá corregir las diferencias entre la temperatura real y la deseada.

En el caso del control de la velocidad del vehículo, son muchas las variables externas que pueden afectar a la velocidad. Obsérvese cómo inyectando la misma cantidad de combustible, la velocidad será distinta en función de parámetros como la pendiente de la carretera, la rugosidad del asfalto, la velocidad del viento, etc.

 Finalmente, hay que destacar que hay casos (sistemas inestables) en los que los objetivos no pueden conseguirse, ni siquiera de manera aproximada, sin el uso de la realimentación.

Considérese, por ejemplo, el caso de intentar mantener un bastón verticalmente apoyándolo sobre un dedo. La realimentación visual puede conseguir que, con cierta habilidad, el bastón se mantenga erguido. Sin embargo, este objetivo no sería posible si el experimento se realizase con los ojos cerrados.

Otro ejemplo clarificador es el caso de intentar conducir un coche con cristales opacos sin más información que un mapa de la carretera. Al no tener conocimiento preciso ni de la posición ni de la orientación del vehículo, lo más probable es que el vehículo se salga de la carretera. Esto no tiene por qué suceder en caso de conducir con cristales transparentes, ya que la realimentación visual permitirá corregir errores para que el vehículo no abandone la carretera.

Casos similares de sistemas inestables se tienen, por ejemplo, en el despegue de un cohete, que no podría llevarse a cabo sin conocer la inclinación del mismo en cada momento; o de sistemas en los que se produce una reacción en cadena, como es el caso de los reactores de las centrales nucleares, en los que para decidir la longitud de las barras de control que hay que introducir para inhibir la reacción es necesario conocer la temperatura alcanzada.

Por otra parte, el uso de la realimentación implica, de manera inherente, tener que realizar una estimación o medida de las variables que se empleen en la toma de decisiones. Estas medidas se realizan utilizando dispositivos sensoriales, o simplemente sensores. Existen sensores de múltiples clases destinados a medir o estimar distintos tipos de variables. Así, hay sensores utilizando distinta tecnología para medir temperaturas en función del rango de la misma, sensores para medir presión, caudal, velocidad, viscosidad, así como una infinidad de variables más.

En los ejemplos anteriores donde se utilizaba realimentación visual, se supone que el

sensor son los ojos, cuya información se transmite al cerebro para que éste tome las decisiones oportunas (colocar las manos en el sitio adecuado, girar el volante, etc.). La misma información podría ser obtenida mediante una cámara, proporcionando una imagen de la situación. La diferencia principal entre utilizar los ojos o una cámara no es el sensor en sí, sino la gestión de la información que proporciona el sensor. En el caso de utilizar los ojos la información la gestiona el cerebro, mientras que en el caso de la cámara, la información se trata por un computador donde deben haberse programado algoritmos adecuados.

El mayor problema que puede tener el uso de la realimentación es que la información estimada no sea fiable o sea corrupta. Los sensores como mecanismos de medida pueden fallar, aportando información incorrecta, que pueden provocar una toma de decisiones inadecuadas. Por ello, en muchos sistemas industriales es conveniente, en aras a la seguridad, tener redundancia en las medidas para poder detectar, al menos, que la información realimentada no es fiable.

2.2. Etapas de diseño de un sistema de control

El efecto de la realimentación, como ya se ha dicho, puede ser altamente beneficioso. Sin embargo, no todo controlador realimentado tiene por qué ser satisfactorio. Se necesitan los conocimientos adecuados y un diseño cuidadoso para llevar a buen puerto un proyecto de control. Este es el motivo que justifica la existencia de la *ingeniería de control* como disciplina.

El proceso de diseñar un sistema de control normalmente exige una serie de demandas por parte del equipo de ingeniería encargado de llevarlo a la práctica. Estas exigencias con frecuencia emergen como un procedimiento de diseño paso a paso tal como sigue (Skogestad y Postlethwaite, 1995):

- Estudiar el sistema que se desea controlar y obtener información inicial acerca de los objetivos de control. Es muy conveniente considerar el sistema desde un punto de vista «sistémico».
- 2. Modelar el sistema. El modelo debe reflejar los aspectos más importantes del problema que se trata. Hay que tener en cuenta que los modelos muy detallados y precisos suelen ser demasiado complejos para utilizarlos en este campo (en el caso de disponer de uno de estos modelos se puede obtener una simplificación del mismo).
- 3. Analizar el modelo resultante y determinar propiedades que puedan ser interesantes para la síntesis del algoritmo (controlador).
- 4. Decidir qué variables se desea controlar (salidas controladas).

- 5. Decidir que variables se miden y cuales se manipulan: ¿qué sensores y accionadores se utilizarán y donde se colocarán?
- 6. Seleccionar la configuración de control.
- 7. Decidir el tipo de controlador que se va a emplear teniendo en cuenta el modelo previamente desarrollado.
- 8. Basándose en los objetivos de control dados en el paso 1, decidir las especificaciones que deberá satisfacer el sistema de control una vez implementado.
- 9. Diseñar el controlador (síntesis del algoritmo de control). El algoritmo se puede diseñar utilizando multitud de técnicas, en función de los objetivos que se persigan con el control. Un ejemplo común lo tenemos en el control del motor de un coche de Fórmula 1. El mapa de inyección (parte del algoritmo de control) que se utiliza es distinto si se pretende que el coche desarrolle la máxima potencia o si se pretende que se ahorre la máxima cantidad de combustible posible.
- 10. Analizar el sistema controlado resultante para ver si se satisfacen las especificaciones impuestas en el paso 8 y si no se cumplen modificar las especificaciones (ir al paso 8) o el tipo de controlador (ir al paso 7).
- 11. Simular el sistema controlado resultante utilizando un computador o un modelo a escala del proceso. Esta etapa es conveniente para prevenir posibles fallos del sistema de control sin que se dañe al sistema real. Como ejemplo, supóngase que se pretende controlar una pila de combustible de hidrógeno para generar electricidad. Previamente a probar el controlador con la propia pila, y en aras de disminuir el riesgo de dañarla, sería conveniente probarlo con un simulador (basado en el modelo desarrollado), para analizar qué actuaciones propone aplicar el algoritmo de control.
- 12. Si es necesario repetir todo el procedimiento desde el paso 2.
- 13. Seleccionar el hardware y el software e implementar el controlador en una plataforma adecuada para que pueda ser ejecutado. Hoy en día, las plataformas más
 habituales suelen ser sistemas más o menos complejos, basados en microcontroladores o microprocesadores. En este punto es conveniente recordar la analogía:
 «el control es a la electrónica como la inteligencia al cerebro». Esto significa que el
 control no será mejor porque el microprocesador sea mejor (siempre que se cumplan unos mínimos), sino porque el algoritmo proponga actuaciones mejores.
- 14. Comprobar y validar el sistema de control y si es necesario realizar un ajuste fino en línea del controlador.

Estos son los pasos comúnmente establecidos de las etapas de diseño de un sistema de control que es esencialmente un procedimiento iterativo. Tal como se ha planteado, el ingeniero de control empieza su labor una vez el dispositivo a controlar ya está diseñado.

Esto suele ser lo habitual. Sin embargo, en ocasiones puede ser muy conveniente que el ingeniero de control participe en el diseño del sistema. Esto se debe a que, a pesar de los grandes beneficios que se pueden conseguir mediante el control automático, existen límites de los sistemas a controlar que no pueden ser superados por el sistema de control. Y es el ingeniero de control el que puede y debe sugerir cambios en el diseño de los sistemas de manera que los límites alcanzables en cuanto a prestaciones de control sean razonables. Un pecado capital del control automático es creer que los sistemas que se van a controlar están dados a priori. Muy buenos argumentos para el diseño integrado de un proceso y de su sistema de control fueron ya expuestos de forma muy elocuente en el trabajo de Ziegler y Nichols (1943). Nunca un buen diseño de un sistema de control puede enmascarar un mal diseño del proceso.

El control de vuelo es un buen ejemplo de diseño integrado de control y proceso. Los hermanos Wright triunfaron donde otros habían fracasado porque hicieron un aeroplano inestable que era maniobrable. Posteriormente se aprendió a construir aeroplanos estables y maniobrables. Hay todavía ventajas sustanciales en tener aviones inestables que descansan sobre un sistema de control para su estabilización. Los modernos aviones de combate obtienen sus elevadas prestaciones de esta manera.

Cuando el sistema de control automático se hace una parte crítica del proceso puede hacerse también de misión crítica lo que significa que el sistema fallará si lo hace el sistema de control. Esto introduce fuertes demandas sobre la fiabilidad del sistema de control. Un caso interesante de las consecuencias de esto se analiza en Stein (2003). Otros ejemplos se encuentran en el desarrollo de la instrumentación donde la precisión y el ancho de banda se pueden mejorar en algunos órdenes de magnitud mediante una combinación apropiada del control por realimentación y el diseño del instrumento. En robótica, se obtienen mejoras sustanciales en prestaciones, precisión y precio mediante una estructura mecánica flexible que obtiene su amortiguamiento mediante un sistema de control automático. Ejemplos análogos se encuentran en mecatrónica y en los sistemas de potencia.

2.3. Beneficios del control automático

Como ya se ha comentado mediante el control automático se pueden conseguir muchos beneficios. Así, una estrategia de control convenientemente desarrollada frente a otra que simplemente funcione, puede hacer que se consigan alcanzar los mismos objetivos con un considerable ahorro de energía. A modo de ejemplo, cada vez son más las plantas de producción del sector petroquímico en las que se están abordando la revisión de las estrategias de control de ciertas variables, consiguiendo un ahorro considerable en los costes de producción.

Por otra parte, sólo con un buen conocimiento de las materias antes enumeradas se puede llegar a conseguir desarrollar sistemas con altas prestaciones, capaces de competir en el mercado. Por ejemplo, una plataforma giro estabilizada a bordo de un helicóptero sobre la que se sitúa una cámara (piénsese, a modo de ejemplo, en las imágenes aéreas de una carrera ciclista) necesita una precisión de apunte de varios micro radianes para poder capturar imágenes aptas para ser emitidas por televisión. Y todo ello a pesar de los movimientos y vibraciones del helicóptero en vuelo. Pues bien gracias al conocimiento, entre otras, de tecnologías como el control automático, ya existen empresas españolas capaces de comercializar este tipo de sistemas.

Se requieren también altas prestaciones en sistemas de generación de energía, y especialmente en las de tipo renovable, dado el continuo desarrollo de complejos sistemas de captación y gestión de energía. La necesidad del diseño de adecuados algoritmos de control se hace claramente patente cuando se desea maximizar la producción intentando minimizar los costes asociados.

Algunos ejemplos de sistemas de captación y generación se tienen en sistemas donde la fuente de energía primaria es el sol o el viento. Así, en el control de plantas solares térmicas con captadores cilindro-parabólicos el control está presente en multitud de elementos: desde la gestión de los motores para que los captadores apunten al Sol, hasta la gestión en línea del tiempo de residencia del fluido que circula por los tubos situados en el foco de la parábola.

Por otra parte, en la actualidad se están desarrollando complejas placas fotovoltaicas con mini concentradores solares a fin de aumentar en varios órdenes de magnitud la capacidad de captación de energía. El efecto pretendido es similar a lo que sucede cuando se intenta quemar un papel con una lupa enfocada al sol. Pues bien, para poder sacar provecho de esta tecnología, es necesario ser capaz de hacer que las placas apunten al sol



Planta solar térmica. Captadores cilindro-parabólicos.

(que se mueve de manera continua) con una precisión de décimas de grado. Esto obviamente no es posible sin una elaborada estrategia de control.

El auge de la energía eólica ha sido posible gracias, entre otros factores, al éxito del diseño de controladores que consiguen que el sistema opere cerca del punto óptimo de funcionamiento y a una buena gestión cuando hay fallos en el sistema.

Los algoritmos de control tienen también un papel notable en el desarrollo de los nuevos coches híbridos, combinando motores de combustión con motores eléctricos. Así, éstos serán los encargados de gestionar, de manera automática, cuándo debe actuar un motor u otro, cómo gestionar la potencia cedida por los motores, en qué condiciones y en qué medida activar los sistemas de recuperación de energía, etc. Todo ello al margen de las nuevas fun-



Parque eólico.



Vehículo híbrido.

cionalidades que cada vez son más comunes en coches de gama media (aparcar sin intervención del conductor, avisos de posibles colisiones, etc.).

En definitiva, para seguir siendo competitivos en distintas tecnologías, no hay más remedio que continuar diseñando nuevos equipos, cada vez más complejos, que sean capaces de incrementar las prestaciones de los ya existentes. En todas las situaciones hay que tener muy presente que el control automático cada vez se hace más imprescindible para poder sacar provecho de estos nuevos ingenios.

Así, en las plantas industriales modernas, con idea de optimizar el diseño y el rendimiento energético se están acoplando entre sí distintas partes de una planta que anteriormente estaban desconectadas. Por ejemplo, el agua utilizada en un intercambiador de



Ejemplo de catástrofe debida al fallo del sistema de control: central nuclear de Chernóbil.

calor para enfriar un determinado fluido, que en el pasado se «tiraba», ahora se reutiliza para extraer parte de la energía absorbida. Esto hace que las plantas actuales estén interconectadas y que cualquier cambio local pueda afectar a una gran parte de la misma. Sin un control apropiado este aprovechamiento sería inviable. Este control debe ser un control integrado y coordinado.

Como ya se ha comentado también el diseño de nuevos aviones de combate se realiza pensando en incrementar su maniobrabilidad, de forma que sean capaces de realizar acrobacias (cambios bruscos de dirección a altas velocidades) que antes no eran posibles. Por supuesto que el propio diseño de la estructura es tremendamente importante. Pero hay que tener en cuenta que el resultado es un vehículo aéreo que ningún piloto, por sí sólo, sería capaz de pilotarlo. Se deben plantear, de manera simultánea al diseño de la aeronave, estrategias de control que, en función de la situación concreta (recuérdese el concepto de la realimentación), sean capaces, como mínimo, de ayudar al piloto en la conducción.

Como puede intuirse con estos y otros muchos ejemplos, diseñar un buen algoritmo de control puede ser una tarea no trivial, que si se abordase sin los conocimientos adecuados, pueden provocas fallos de funcionamiento, que en algunos casos pueden resultar catastróficos.

Es muy conocido el accidente, que se produjo precisamente en España, que provocó la pérdida de un prototipo del avión *Eurofighter* en uno de sus vuelos de prueba. El fallo fue debido a un problema del algoritmo de control que gestionaba la potencia de sus

motores. Algo similar se puede decir del desastre nuclear de Chernóbil (Stein, 2003). Afortunadamente esto fallos del sistema de control, debidos frecuentemente a la manipulación irresponsable del diseño de control, se producen con poca frecuencia.

Otro ejemplo de situación catastrófica es el problema conocido como colapso de tensión que ha provocado grandes apagones de los sistemas eléctricos en distintas partes del mundo (Columbia Británica en 1979, en Bélgica en 1982, en Suecia en 1983 o en Bretaña en 1987). Es un problema asociado al control de la potencia generada en un sistema eléctrico y que se manifiesta por la inestabilidad de la tensión que desemboca mediante un mecanismo de «reacción en cadena» en la caída total del sistema. La complejidad cada vez más creciente de los sistemas eléctricos requiere de algoritmos más sofisticados para su control.

En estos ejemplos se refleja que un mal diseño de un control puede tener serias consecuencias. Por lo tanto, se hace necesario seguir formando a profesionales en esta rama de la ingeniería para seguir avanzando y compitiendo en una economía global.

Para finalizar esta sección, es conveniente destacar la transversalidad y ubicuidad del control automático, presente en prácticamente la totalidad de las situaciones cotidianas, necesario para el funcionamiento apropiado de multitud de dispositivos de diversa índole (eléctricos, mecánicos, termodinámicos, químicos, biológicos, etc.). A pesar de su importancia, su presencia, afortunadamente, suele pasar inadvertida para gran parte de la sociedad.

2.4. La comunidad del control automático

Una forma de explorar el estado de una disciplina es analizar su estructura organizativa a nivel mundial y repasar los contenidos de las conferencias importantes a lo largo de una serie de años.

Una gran parte de los primeros trabajos en control automático estuvieron clasificados debido a su conexión militar. Muchas ideas emergieron independientemente en muchos países. Muchos investigadores comprendieron que habría enormes beneficios para todos mediante un intercambio abierto de ideas. Esta reflexión se convirtió en el motor para la internacionalización de la automática como disciplina científica y se hizo muy patente después de la segunda guerra mundial. Tras varias conferencias internacionales en 1952 y 1953, se constituyó un organismo de carácter internacional: la IFAC (*International Federation of Automatic Control*) que se convirtió en un referente de esta disciplina. Muchas cuestiones se concretaron en la reunión de Heidelberg en 1956 con participación de 19 países, entre ellos España. Actualmente IFAC agrupa a organizaciones de 48 países. Des-

de 1960 IFAC organiza cada tres años el Congreso Mundial del control automático que en 2002 tuvo lugar en Barcelona. Las inscripciones a este congreso manifiestan un aumento continuado y actualmente los asistentes son alrededor de 2.500. Las actividades de IFAC se han ampliado sustancialmente y hoy día organiza reuniones de diferentes tipos casi cada semana (http://www.ifac-control.org/).

IFAC, a través de la editorial *Elsevier* tiene bajo su cargo a importantes revistas con intereses en el control automático. Podemos citar como la más importante a la revista *Automatica* que es una revista de alto contenido teórico, el *Journal of Process Control*, también de alto nivel teórico y la revista *Control Engineering Practice* dedicada a las aplicaciones sobre control automático. IFAC colabora con la publicación de la revista *Engineering Applications of Artificial Intelligence* en donde tienen cabida aplicaciones de la inteligencia artificial aplicadas al control.

A nivel europeo en 1990 se constituye la *European Union Control Association* (EUCA) con la participación de 19 países entre ellos España. Los objetivos fundamentales de la EUCA son la promoción de iniciativas que tengan como finalidad la mejora en los intercambios científicos, la diseminación de información, la coordinación de redes de investigación y la transferencia de tecnología en el campo de la automática en el seno de la Unión Europea. Bianualmente celebra la *European Control Conference* (ECC), con un ámbito mundial (en 2005 se celebró en Sevilla conjuntamente con el CDC que se comenta posteriormente). EUCA publica la revista *European Journal of Control* (EJC).

Con un idea análoga en Asia y Australia se ha fundado la Asian Control Professor's Association (ACPA) que organiza también un congreso bianual y edita la revista Assian Journal of Control (AJC).

El Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), es una institución de carácter más general ya que engloba otras disciplinas relacionadas con la electricidad y la electrónica que cuenta con más de 375.000 miembros estructurados en sociedades. Una de estas sociedades es la Control Systems Society (CSS) con más de 10.000 socios en todo el mundo. La CSS del IEEE publica entre otras, las revistas IEEE Control Systems Magazine de carácter general, IEEE Transactions on Automatic Control, sobre desarrollos teóricos y IEEE Transactions on Control Systems Technology centrada en aplicaciones. Además organiza múltiples congresos internacionales entre los que destaca la Conference on Decision and Control (CDC) con periodicidad anual que usualmente cuenta con alrededor de 1000 participantes.

La Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM) tiene un Grupo de Interés Especial en teoría de control y publica uno de las principales revistas en el área, el SIAM Journal on Control and Optimization. Esta revista está considerada como una de las principales en matemáticas sobre teoría de control.

Springer International publica la revista Mathematics of Control, Signals and Systems, la cual presenta sofisticados artículos de matemáticas en control y procesamiento de señal. Desde el principio de su publicación esta revista se ha convertido en un importante foro para nuevas ideas sobre la matemática del control. De forma similar la editorial Taylor and Francis publica la revista International Journal of Control de un nivel parecido respecto a su altura matemática.

A nivel interno de distintos países destaca y sin ánimo de ser exhaustivo se puede citar en Estados Unidos el *Automatic Control Council* que es la organización nacional miembro de IFAC. Organiza anualmente la *American Control Conference* en colaboración con otras sociedades de ingeniería. El instituto más importante en Europa con interés en el control automático es el *National Research Institute in Computer Science and Automation* (INRIA) en Francia, el cual se dedica a la ciencia de la computación y a la automática en general. INRIA tiene más de 800 investigadores que incluyen a un grupo muy activo de jóvenes matemáticos y científicos de la computación. INRIA ha conseguido un excelente ejemplo de cómo usar las matemáticas en aplicaciones avanzadas en la industria. En Italia, hay un grupo muy activo en la comunidad de control, lo mismo que en Gran Bretaña, Alemania y los Países Bajos, áreas como las de control multivariable, control no lineal, control estocástico y control óptimo, se han desarrollado fuertemente en estos países. En Suecia se trabaja en controladores autosintonizados y control adaptativo aplicado a la industria.

La International Society of Automation (ISA) nació en 1945 como la Instrument Society of America y ha evolucionado hacia una sociedad mundial de profesionales de la Automatización con más de 30.000 miembros. Su nuevo nombre refleja su carácter intenacional actual. Su campo de actuación cubre el desarrollo de estándares industriales, la certificación profesional de titulados, las publicaciones de libros y de la revista ISA Transactions y la organización de cursos y de la mayor feria de Automatización. La sección española tiene más de 400 profesionales y organiza numerosas actividades, muchas de ellas relacionadas con la formación.

En España el interés por el control automático se ha consolidado definitivamente en los últimos años. Los esfuerzos organizativos y divulgativos del control automático se canalizan a través del Comité Español de la Automática CEA (http://www.cea-ifac.es), miembro de IFAC y propulsor de numerosas iniciativas en el ámbito de la automática en general y del control automático en particular. Publica desde hace cuatro años la Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial (RIAI) que recientemente ha logrado su indexación, entre otros, en el SCI, lo que da idea del nivel que la automática está adquiriendo en la comunidad hispano parlante. CEA organiza anualmente las Jornadas de Automática con un número de participantes en constante aumento que actualmente supera los 250 asistentes.

2.5. El ingeniero de control automático

La ingeniería de control estudia las características dinámicas de los sistemas, analizándolas por medio de modelos dinámicos, para diseñar controladores que hagan que dicho sistema se comporte de una manera determinada. El uso de técnicas de control automático en la industria es de cada vez más importante para que los sistemas producidos cumplan requisitos de funcionalidad, coste y seguridad. La tendencia es un aumento de la complejidad de estos productos, lo que conlleva requisitos cada vez más exigentes:

- Desarrollo de productos competitivos, tanto en coste como en prestaciones. Un número creciente de productos industriales requieren el uso de técnicas avanzadas de control, al menos en alguno de sus subsistemas, para proporcionar unas prestaciones competitivas o, incluso, para poder comercializarse, por la necesidad de cumplir estrictas normativas nacionales o internacionales. Un ejemplo son los motores de los automóviles actuales. Los sistemas de control juegan un papel fundamental tanto para aumentar las prestaciones de los mismos, como para que las emisiones de gases cumplan las restricciones medioambientales vigentes.
- Reducción de costes de producción. Desde hace años, la automatización de las líneas de producción es casi imprescindible para reducir los costes y aumentar la calidad del producto final. La complejidad de estos sistemas aumenta por diversas razones. En determinadas industrias, el desarrollo de controladores para los equipos individuales de una línea de producción es una tecnología madura. Sin embargo, los requisitos sobre las líneas de producción aumentan en complejidad, ya que se incide sobre otros aspectos como la garantía de la calidad final del producto. Así, se hace énfasis sobre aspectos sistémicos como la disponibilidad de registros históricos y la trazabilidad. Los registros históricos permiten analizar el comportamiento del sistema para predecir posibles fallos e identificar mejoras en el proceso. La trazabilidad de materia prima o productos intermedios para analizar su efecto sobre el producto final y determinar las causas de defectos. En algunas industrias, como la alimentaria, hay problemas pendientes de una solución adecuada. Se trabaja con procesos continuos, que emplean materia prima de distinta naturaleza, que se mezcla y combina.
- Seguridad en la operación: Los requisitos de seguridad son cada vez más relevantes en los sistemas actuales. Esto ha ocurrido tradicionalmente en sistemas de aviónica, centrales nucleares o sistemas de control ferroviario. En otras industrias, como la producción de alimentos o farmacéutica, la calidad final del producto tiene que estar perfectamente comprobada, para evitar daños a los consumidores. Los sistemas de monitorización cobran un papel fundamental en los mismos, para detectar cualquier desviación respecto al comportamiento planificado que pudiera entrañar peligro. El conocimiento de la dinámica y teoría de sistemas de los ingenieros de

control automático constituye una excelente base para participar en su diseño y, en concreto, para identificar las variables del sistema más relevantes para una pronta detección de sucesos potencialmente peligrosos.

- Interacción con operadores: Tradicionalmente, los operadores tenían una interacción continua con algunos procesos de producción. Eran los encargados de realizar determinadas operaciones de forma manual. El alargamiento de los turnos laborales y la necesidad de garantizar un funcionamiento adecuado, han ido sustituyendo estos operadores por otros cuya misión fundamental es observar que toda funciona correctamente y avisar a la persona responsable si se detectan fallos. Para tal fin es importante que un especialista identifique las situaciones de alarma en los procesos automatizados, identifique las variables fundamentales a analizar y colabore en el diseño del interfaz operador-máquina, de forma que se muestre la información necesaria en forma comprensible. Además habrá que proporcionar los procedimientos necesarios a estos operadores para poder tratar situaciones de alarma.

Este panorama revela la importancia del profesional del control automático, ya que posee unos conocimientos fundamentales sobre la dinámica de los procesos y la tecnología para modificar el mismo de acuerdo a unos requisitos de funcionamiento determinados. Como se ha enfatizado previamente, el ingeniero de control automático debe tener un conocimiento multidisciplinar, que le permita formar parte de equipos con los diferentes especialistas que son necesarios para el desarrollo de sistemas con la complejidad mencionada.

Hay varios perfiles del profesional del control automático en la industria. El más tradicional el desarrollo de algoritmos de control, cuyo objetivo específico es conseguir un comportamiento determinado del sistema global. La metodología de trabajo que se utiliza se basa en abstraer los rasgos más significativos del problema particular que se considera, formulándolo luego en términos de modelos matemáticos y especificaciones de su comportamiento, y aplicando a continuación la teoría y métodos de control para analizar los modelos y diseñar algoritmos que aseguren que el sistema en lazo cerrado (proceso + controlador), se comporte con la dinámica deseada. Finalmente la solución algorítmica debe interpretarse en términos de la realidad e implementarse en un dispositivo físico sobre el sistema real asegurando un funcionamiento seguro y eficiente.

Un ejemplo de este perfil es el diseñador de los sistemas de control de un satélite, que debe asegurar una dinámica adecuada del mismo. Para ello cuenta con sensores para la determinación de variables como la velocidad o posición (sensores solares, sensores estelares, magnetómetros, etc.) y accionadores, para variar estas variables (volantes de reacción, magnetopares, etc.). El ingeniero diseña los algoritmos de control y los simula para su validación, empleando herramientas adecuadas. Posteriormente, se genera el código

(semi)automáticamente correspondiente al algoritmo de control, que se integrará con los manejadores de los dispositivos de entrada/salida. Un conjunto exhaustivo de pruebas deberán validar el correcto comportamiento del sistema.

El diseño de un (sub)proceso de producción es otro aspecto en el que los profesionales del control automático tienen un campo de actuación importante. El diseño inicial de la línea de producción se debe realizar junto con los expertos en el dominio concreto del producto (alimentos, medicinas, textiles, etc.). Una vez definidos los procesos generales, es labor del ingeniero asegurar el correcto funcionamiento de los subprocesos individualmente, definir la temporización del sistema y la secuenciación adecuada de las actividades.

En los sistemas complejos operativos, el profesional del control automático es muy valioso para monitorizar el comportamiento del sistema y actuar ante sucesos no deseados. Entre sus actividades está el análisis de los históricos del sistema, para detectar desviaciones e identificar áreas de mejora. También puede ser el responsable de tomar las decisiones finales en caso de emergencias. Para tal fin, es una práctica común que haya definido con anterioridad protocolos de actuación para tratar este tipo de situaciones.

De estos ejemplos de perfiles profesionales, puede deducirse que está ingeniería abarca un rango muy amplio, tanto en la formulación de sus conceptos, como en sus campos de aplicación o en las tecnologías que utiliza y que comparte zonas comunes con muchas otras disciplinas.



Línea de fabricación flexible.

En particular vale la pena resaltar que los conceptos básicos de modelado dinámico, realimentación, estabilidad, robustez, optimización, etc. son conceptos generales aplicables no solo en sectores tradicionales de máquina herramienta, control de procesos, robótica, electrónica, generación de energía, etc. sino a muchos otros campos, lo que facilita al ingeniero de control su incursión en áreas no tradicionales como los sistemas biológicos, gestión de redes o las finanzas por citar algunos.

Esa generalidad puede verse desde varios puntos de vista diferentes. Por un lado el ingeniero de control necesita una formación abierta y amplia para desempeñar sus funciones. Esto es particularmente cierto, no solo en los conceptos de la disciplina y su matemática asociada, sino en cuanto a que los sistemas con los que trabaja son máquinas, procesos de producción, circuitos, vehículos, etc. que funcionan como un todo, con partes a veces muy diversas en su naturaleza (eléctricas, mecánicas, térmicas, químicas, informáticas, etc.) y donde se deben considerar además aspectos de seguridad, de legislación, de organización, etc., de modo que necesita relacionarse y comprender una gran pluralidad de elementos, lo que requiere una formación básica de amplio espectro.

En particular, la implementación física de los sistemas le obliga a tratar con tecnologías muy diversas: tradicionalmente los sistemas neumáticos, hidráulicos y electromecánicos han dominado en el pasado los sistemas de control y los sensores y accionadores para dar entrada en escena posteriormente a dispositivos electrónicos y microprocesadores, siendo las comunicaciones, los sistemas informáticos en red y los microsistemas elementos esenciales del panorama actual.

Por otro lado, la consideración de los procesos, máquinas, etc. como un sistema dinámico con interrelaciones entre sus partes y con su entorno constituye uno de los elementos distintivos del ingeniero de control. Para este, las interacciones entre las distintas partes y su efecto en el funcionamiento global del sistema en el que está trabajando son lo fundamental, no los detalles internos de cada una de ellas. Esas partes cumplen funciones diferentes y su tarea no es tanto analizarlas hasta su último detalle como estudiar sus interrelaciones. No trata de diseñar los componentes, sino, conociendo su funcionalidad, unirlos y estudiar y diseñar su funcionamiento global. Desde este punto de vista, el ingeniero de control debe tener visión de ingeniero de sistemas y cualidades de integrador de sistemas.

También vale la pena mencionar que las fronteras de los sistemas de control aparecen cada vez más difuminadas con otros sistemas de información, gestión y toma de decisiones dentro de la empresa y los servicios, particularmente apoyados en sistemas informáticos (ERP, MES, etc.) con los que deben cooperar y compartir información. De hecho, el campo de actuación del ingeniero de control está ampliándose de sus aplicaciones tradicionales en la regulación de procesos, maquinas, etc. a otros sistemas en los que se reconoce que los aspectos dinámicos, de interacción, de estabilidad, de funcionamiento ópti-

mo de acuerdo a algún criterio, son elementos importantes y que la complejidad de los mismos impide un tratamiento eficaz si se toman decisiones basándose solo en la experiencia o el ensayo. El control de la operación de estos sistemas, normalmente de gran escala, entre los que podemos citar la gestión de redes de agua, oleoductos, hospitales, etc., son un reto y una oportunidad importante para la aplicación a estos niveles de una metodología basada en el modelado dinámico, el análisis y la toma de decisiones en base a modelos. Estas consideraciones refuerzan la idea de la necesidad de una formación amplia con una visión sistémica de carácter globalizado.

También es importante señalar la otra cara de la moneda. Para ser capaz de entender el funcionamiento y definir la operación automática y de seguridad, diseñando su sistema de control y optimización, se necesita un conocimiento razonable de los mismos que solo puede conseguirse con una especialización en un campo determinado: robótica, industria de procesos, bioingeniería, electrónica, etc., aun cuando se trabaje en cooperación con especialistas del sector. Ello es particularmente cierto en la medida en que los sistemas (máquinas, procesos, etc.) son cada vez más complejos y de mayor envergadura.

Ello no está en oposición a lo comentado anteriormente. El ingeniero de control debe tener formación básica amplia en muchas disciplinas lo que, junto a la formación en su campo específico, le permitirá realizar tareas de instalación, mantenimiento, operación, comerciales, etc. y de diseño de sistemas de control y automatización a un cierto nivel sobre una generalidad de procesos y sistemas. Pero si consideramos las tareas de más alto nivel asociadas al diseño de sistemas de control de sistemas de cierta complejidad, de optimización del funcionamiento, etc. es necesaria una especialización adicional o previa en un campo determinado.

Considérense al respecto áreas de trabajo como la mecatrónica, la biología de sistemas, el control y optimización de procesos, el control de redes de distribución de energía, la robótica móvil, los sistemas aeroespaciales, etc. o el campo del diseño integrado proceso-sistema de control, para entender que la especialización en estos campos es un requisito para hacer control en los mismos. Y a la vez, y eso es uno de los aspectos más atractivos de la automática, debe tenerse en cuenta que las mismas ideas básicas de dinámica, estabilidad, realimentación, respuesta en frecuencia, etc., se aplican a todos esos campos, lo que facilita entender sus mecanismos básicos y funcionamiento.

El reciclado del profesional del control automático es una necesidad dado el dinamismo de la tecnología en este dominio, al igual que ocurre con muchas ingenierías. Es evidente la necesidad de conocer los avances del mercado en cuanto a instrumentación y equipos de control, herramientas de desarrollo, modelado y simulación, técnicas avanzadas de control, etc. El objetivo obvio es aplicar éstas para mejorar las líneas de producción o sistemas de control existentes.

Finalmente, es importante hacer notar que la mayoría de los profesionales del control automático terminan realizando labores con un importante componente de gestión cuando adquieren un cierto grado de experiencia laboral. La consecuencia es que se alejan de las labores puramente técnicas y pasan a dirigir equipos humanos y a tomar decisiones estratégicas sobre la viabilidad de la instalación de una planta controlada o la realización de unas determinadas prestaciones como objetivo para el desarrollo de nuevos sistemas de control. El bagaje técnico del profesional de control automático será posiblemente el más adecuado cuando el componente de control tiene una influencia vital en el comportamiento del sistema final.

En algunas de estas actividades, los conocimientos puramente técnicos y la experiencia adquirida son suficientes para su correcta ejecución. Sin embargo, para otras es conveniente una formación adicional que en algunos casos no está contemplada en los planes de estudios actuales, bien por su especificidad o por el nivel de especialización exigido. Entre estas habilidades se encuentran las técnicas de gestión de equipos humanos, de gestión de proyectos complejos, de análisis de riesgos, etc. El profesional de control automático debe tener en cuenta estos aspectos para poder desarrollar una trayectoria laboral exitosa.

En la sección 9.1 se proponen acciones estratégicas para que el sistema universitario español pueda generar los profesionales del control automático que la sociedad española necesitará en el futuro próximo.

2.6. El control automático y las nuevas tecnologías

2.6.1. La triple C

El control automático de procesos industriales permite alcanzar unas prestaciones de funcionamiento que eran inimaginables antes de la irrupción de las nuevas tecnologías de la computación ubicua, de las comunicaciones digitales y de la instrumentación microelectrónica, lo que se ya conoce como la simbiosis de la triple C (control + computación + comunicación).

Estas nuevas tecnologías permiten que los nuevos desarrollos de sistemas de control puedan ser tan sofisticados como sean necesarios para garantizar las exigentes prestaciones de funcionamiento de los actuales procesos industriales, teniendo en cuenta la inherente incertidumbre en el comportamiento de los procesos sujetos a condiciones de contorno cambiantes y perturbaciones no predecibles e incluso teniendo en cuenta que algunos de los componentes del procesos pueden fallar en cualquier momento y el proceso controlado debe poder seguir proporcionando unas mínimas prestaciones de funcionamiento seguro.

Las posibilidades que abren estas nuevas tecnologías son una gran oportunidad para el desarrollo de nuevos algoritmos de control avanzado que incorporan aspectos de modelado e identificación de la dinámica de sistemas complejos con incertidumbre, de diseño de controladores robustos, óptimos y/o adaptativos con capacidad de reconfiguración ante posibles fallos, aplicación, interconexión y comunicación a sistemas complejos de gran escala y finalmente la implementación software y hardware en sistemas empotrados (embedded control systems) que se integran con los propio procesos a controlar.

Las primeras aplicaciones de control automático se centraban más en el estudio de la física del sistema en sí, que en la propia función de control. Así en el control de temperatura de edificios lo importante es conocer su comportamiento térmico, o en el autopiloto de un avión lo esencial es comprender la dinámica de orientación del avión. La situación actual es muy diferente ya que el control interacciona con las capacidades enormes que permiten los computadores actuales y con la potencia y bajo coste de las comunicaciones para controlar sistemas cada día más complejos en dimensión (de gran escala) o de comportamiento incierto (comportamiento complejo). Una de las consecuencias de este cambio hacia sistemas basados en la información es que estamos pasando de una era donde la física era la dificultad a superar para avanzar a otra en la que la complejidad es el problema real.

La presencia de computación ubicua, de comunicaciones digitales y de una gran variedad de instrumentación económica micro/nano electrónica de bajo coste ha cambiado el rumbo y el papel del control automático y sus posibilidades que no tiene nada que ver con los pasados 40 años. En la actualidad se vislumbra un nuevo papel clave para el control automático como es conseguir que los nuevos procesos industriales alcancen unas prestaciones de funcionamiento competitivas y seguras que hace bien poco nos parecerían inimaginables.

2.6.2. Nuevas oportunidades funcionales del control automático

El importante desarrollo de las nuevas tecnologías de la computación y las comunicaciones digitales abre unas posibilidades funcionales inimaginables en el control automático que se irán diseñando y desarrollando poco a poco durante las próximas tres o cuatro décadas. Entre ellas cabe destacar:

- Nuevas estructuras de control distribuido, asíncrono y trabajando en red. Se trata de nuevos sistemas de control distribuido mediante múltiples unidades de cálculo interconectadas a través de una red de comunicaciones que requerirán nuevos formalismos que aseguren la estabilidad, prestaciones y robustez del conjunto. Especialmente estos desarrollos serán fundamentales en aplicaciones de control donde las restricciones de computación y comunicaciones sean críticas, como es el caso de aplicaciones de control de robots, control de redes (agua, energía, comunicaciones, ...)

- Integración de la información, coordinación al más alto nivel y con capacidad de funcionamiento autónomo. Cada vez más los sistemas de control reciben más datos de diversas fuentes heterogéneas de información (sensores de campo, información del entorno, información del operador, criterios del coordinador, situación del mercado y de las materias primas, nueva legislación, etc.) que deben ser integradas y utilizadas adecuadamente para tomar decisiones de control. Los avances de las últimas décadas en el análisis y diseño de sistemas de control robustos se tienen que extender ahora al más alto nivel de toma de decisiones del sistema y tienen que actuar de manera fiable en escenarios realistas.
- Implementación automática de algoritmos de control, con verificación y validación integral. Los actuales sistemas de ingeniería requieren ya la capacidad para realizar un rápido diseño, rediseño e implementación de algoritmos de control automático. Para ellos es necesario disponer de nuevas herramientas potentes de diseño que automaticen el proceso completo para desarrollar nuevos algoritmos, desde la obtención del modelo representativo del sistema hasta la simulación del controlador actuando sobre el sistema real (hardware in the loop simulation), incluyendo la verificación y validación de todo el software.

2.6.3. El impacto de la computación en las aplicaciones del control automático

Una indicación de este cambio es el papel que juegan los sistemas informáticos de tiempo real y los sistemas empotrados (*embedded systems*) en la tecnología moderna. Los sistemas de control informáticos modernos son capaces de tratar cantidades enormes de datos para la toma de decisiones y lógica de control. Cada vez más, estos sistemas software están interaccionando con procesos físicos e introducen algoritmos de respuesta para mejorar sus prestaciones y robustez.

Otra área donde el control de sistemas basados en la información será cada vez más importante está en los sistemas de asignación de recursos y de toma de decisiones. En este sentido, el control se puede describir (Murray, 2002) como la ciencia e ingeniería de asignación óptima de recursos dinámicos bajo condiciones cambiantes e inciertas. Se trata en primer lugar, de identificar y estimar modelos matemáticos que puedan caracterizar para cualquier acción pasada, presente o futura el comportamiento real del sistema incluyendo su incertidumbre y posteriormente utilizar el modelo para decidir las acciones óptimas a aplicar al sistema en los instantes actual y futuro. Aunque se puede considerar que este es un problema de investigación operativa, la incertidumbre y el comportamiento dinámico del sistema, con posibilidad de que se produzcan inestabilidades en el mismo, es un claro ejemplo que necesita la teoría de control automático.

Con el creciente aumento de la dimensión de los sistemas a controlar aumenta el riesgo de que uno o varios componentes del mismo puedan fallar de forma inesperada y por otra parte se exige a estos sistemas un funcionamiento ininterrumpido fiable, eficiente y seguro, por lo que un área emergente del control automático es el desarrollo de sistemas de control con capacidad de detección y diagnóstico de fallos en tiempo real, que permita evaluar el fallo, sus consecuencias y con capacidad de adaptación a la nueva situación para realizar un control tolerante a fallos que mantenga las prestaciones de funcionamiento exigibles en esta nueva situación. Tal como se muestra en la Figura 2.1 se trata en definitiva de diseñar sistemas de control automático con capacidad para evaluar en todo momento la fiabilidad del sistema y del propio sistema de control y asegurar un funcionamiento seguro frente a fallos inesperados.

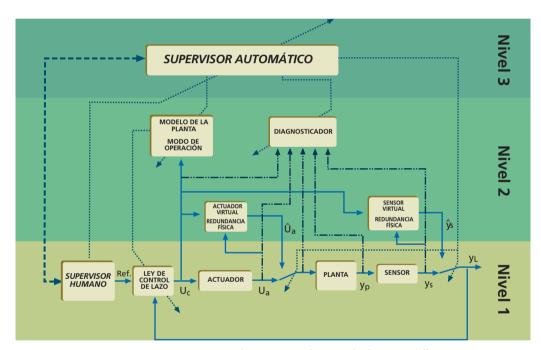


Figura 2.1. Arquitectura de un sistema de control tolerante a fallos.

En este sentido, los programas de software que implementan los algoritmos de control son una posible fuente de crear fallos inesperados, especialmente cuando trabajan en sistemas interconectados con redes de comunicaciones (retardos variables) y a menudo trabajando en entornos adversos, por lo que es vital vigilar el funcionamiento de todo el software del sistema de control monitorizando ininterrumpidamente su funcionamiento y evaluando su grado de confianza a través de la vigilancia. La idea es supervisar de forma rápida y precisa la ejecución del software, comparar las prestaciones reales con las obtenidas con un modelo empotrado del software implementado, en caso de diferir entre uno

y otro, modificar mediante parámetros los algoritmos de operación para mantener las prestaciones deseadas (*self-reconfiguring operation*). Los métodos actuales para verificación y validación de los sistemas software requieren una gran cantidad de pruebas y muchos errores aún no son descubiertos hasta las últimas etapas del desarrollo del sistema de control o incluso cuando el controlador ya está entregado.

3

Ejemplos de aplicación del control automático



En este capítulo se describen someramente algunas de las grandes áreas científicas, tecnológicas o industriales en cuyo desarrollo el control automático desempeña actualmente un papel protagonista esencial. Ello debería servir para ilustrar el carácter horizontal y ubicuo de la automática y su importancia e impacto real en la vida cotidiana.

Caben muchas clasificaciones posibles de las aplicaciones del control automático. Sin ánimo de ser exhaustivos, en este capítulo se tratarán brevemente algunas aplicaciones, ordenadas por temáticas o sectores clave, en las cuales el papel de los lazos de control resulta esencial, con el ánimo de describir con ejemplos concretos la incidencia directa real, tantas veces oculta, que el control automático tiene sobre la vida de las personas.

Se incluyen principalmente aplicaciones consolidadas sobre las que el control automático ha tenido una influencia larga y contrastable, pero también se tratan algunos ámbitos menos clásicos en cuyo desarrollo los principios del control automático realimentado apenas han comenzado a aparecer hasta tiempos relativamente recientes, pero a los que se estima podría contribuir decisivamente en el futuro. Agrupadas por grandes áreas o sectores, describiremos aplicaciones del control automático en:

- Transporte: Sector de automoción, aeronáutico, aeroespacial, ferroviario, marítimo.
- Robótica y mecatrónica: Manipuladores, máquina-herramienta, electromecánica de precisión, robots móviles e inteligentes.
- Grandes instalaciones: Plantas de producción industrial, centrales eléctricas, térmicas, nucleares, grandes laboratorios científicos.
- Control en red y sobre redes de comunicación: Control sobre redes de datos, control de redes de agua, recursos o alimentación energética.
- Microsistemas, sistemas moleculares y sistemas cuánticos: MEMS, control de dinámica molecular y biomoléculas.
- Economía y econometría: Modelos económicos realimentados, predicción identificación y control de variables económicas.

En cada uno de los casos se trata de enfatizar la importancia del control automático desde los orígenes históricos de la aplicación, describiendo brevemente la situación actual y proponiendo algunas estimaciones en torno a líneas o tendencias para el futuro. Ya que la automática es una disciplina difícil de definir o de situar como tal en relación a otras ciencias o tecnologías (fundamentalmente por su carácter transversal generalista o de ciencia auxiliar para el desarrollo de otras) un objetivo importante de este capítulo es definir o acotar el control automático mediante una adecuada descripción de ejemplos reales en los que se utiliza con éxito.

3.1. Transporte

Los sistemas de transporte de personas y mercancías no podrían funcionar sin lazos de control automático. La calidad, fiabilidad, seguridad e incluso la propia existencia de elementos tan cotidianos en la vida de las personas como los automóviles, aeronaves o trenes dependen de manera fundamental del control automático.

3.1.1. Automoción

Desde los inicios de la producción en masa de coches, y singularmente desde los años setenta del siglo XX, con el desarrollo del microprocesador, el sector de automoción ha ido incorporando de forma creciente y sostenida cada vez más componentes electrónicos, sensores, accionadores y sus correspondientes sistemas realimentados para mejorar



En un vehículo de Fórmula 1 abundan los controladores automáticos.

sus prestaciones y fiabilidad. Por mencionar unos pocos ejemplos ilustrativos, los sistemas de inyección electrónica, los controles de tracción o de frenado ABS, o los airbags, son sistemas de control automático cuya presencia, utilidad y necesidad es actualmente sobradamente conocida y reconocida por el gran público.

Un sencillo indicador de la importancia de los sistemas de control automático en el sector de la automoción, lo da actualmente el número creciente de sensores que incorporan los automóviles comerciales, que se cuentan por decenas y que en pocos años podrían llegar al centenar (ABI Research, 2005). Gran parte de estos sensores forman parte de un lazo de realimentación para gobernar magnitudes variadas esenciales para el funcionamiento del vehículo. Un ejemplo extremo de esta tendencia creciente se encuentra en las escuderías de automovilismo de Fórmula 1, donde el rendimiento del vehículo depende de forma crítica de las variables medidas y controladas y la ingeniería de control es un aspecto crucial (Wright, 2001).

La tendencia señalada de incremento del peso de los sistemas de control automático en el sector de automoción no se ha saturado en absoluto, y todas las previsiones apuntan a un aumento en prestaciones y seguridad en los diseños de automóviles comerciales del futuro próximo a través de la inclusión de nuevos lazos de control para múltiples aspectos, como chasis inteligentes para la mejora de la estabilidad y con control activo de suspensión, o sistemas de control de posicionamiento y de velocidad mediante radar (Powers y Nicastri, 2000), todo ello sin contar la incorporación de las tecnologías híbridas o de pilas de combustible en los automóviles, cuya viabilidad, fiabilidad y eficiencia reales dependerán esencialmente de los sistemas de control que las acompañen (Pukrushpan et al., 2004).

3.1.2. Aeronáutico y aeroespacial

El milagro de que un artefacto más pesado que el aire vuele se explica en gran parte por la presencia de sistemas de control de vuelo como parte integrante esencial de la aeronave, sean controles manuales como los de Orville y Wilbur Wright o sean completamente automáticos como por ejemplo los de los modernos cazas militares. Conseguir vencer la fuerza de gravedad de los cuerpos y poner en vuelo una



Turbina de avión.

aeronave pesada es un logro cuya relevancia es fácilmente comprensible por el gran público, que incluso mentes preclaras como la de Lord Kelvin consideraron imposible hace poco más de un siglo (Cerf y Navasky, 1984), y que pone de manifiesto bien a las claras la importancia e impacto real sobre las vidas de las personas que tiene el control automático.

Naturalmente, los sistemas de control de vuelo no son las únicas contribuciones del control automático al ámbito aeronáutico y aeroespacial, y en cualquier aeronave actual los lazos de realimentación se cifran en decenas, cuando no en centenares. Esta tendencia es claramente creciente, a medida que aumenta el número de variables medibles con un coste razonable. Avances como turbinas autorregulables dependiendo de las condiciones y régimen de funcionamiento, con mayor fiabilidad y vida útil más larga (Shaw, 2000), o sistemas de control de estructuras aeroespaciales flexibles (Rutkovsky y Sukhanov, 2007) son elementos de tecnología de probable próxima incorporación comercial para cuya explotación el control automático es cuestión central.

Una tendencia importante en el diseño de nuevos dispositivos aeronáuticos o aeroespaciales es la integración de sistemas en una estructura jerárquica cuyo nivel superior gobierna los lazos de realimentación tradicionales y puede eliminar la necesidad de pilotaje humano. En el ámbito espacial o militar la introducción de este nivel superior de control automático ha sido más rápida, pero en aplicaciones civiles la tendencia también es imparable ya que puede aportar mejoras en prestaciones del dispositivo, ahorro en gastos de operación (al reducir la necesidad de pilotaje humano) o seguridad en ambientes hostiles naturales o artificiales, al no exponer directamente la vida de la tripulación.

3.1.3. Ferroviario

De la misma forma que en otros medios de transporte, la fiabilidad y seguridad del transporte ferroviario depende fuertemente del control automático. Desde hace décadas los sistemas ferroviarios japoneses y estadounidenses han venido incorporando el así llamado Automatic Train Control (Office of Technology Assessment, 1976), y en los años 90 del siglo XX en Europa se promulgó la norma para el European Train Control System (Council Directive, 1996), que hace uso de señales de radio y radar, además de diversa sensorización para guiado y control posicional y de velocidad del transporte ferroviario. La incorporación de estas tecnologías u otras similares, principalmente en los trenes de alta velocidad, se estima que evitan decenas de incidentes o accidentes cada año en todo el mundo.

Entre las tecnologías aplicables al transporte ferroviario prometedoras a medio plazo y que no podrían aplicarse sin control automático puede citarse por ejemplo la levitación



Tren de levitación magnética.

magnética. Los trenes con tecnología MagLev se benefician de una sustentación sin contacto que elimina la fricción con la vía y reduce el desgaste, el mantenimiento, o la necesidad de lubricación, lo cual los hace los más veloces del mundo (Seino y Miyamoto, 2006). Sin embargo la explotación comercial de líneas de trenes MagLev no está extendida, en parte por problemas de coste y seguridad. En la solución de estos problemas el control automático está probablemente llamado a jugar un papel relevante que facilite el desarrollo futuro de esta tecnología.

3.1.4. Marítimo

También en el transporte marítimo el control automático ha jugado y juega un papel importante en múltiples aspectos, desde el comienzo del desarrollo de los pilotos automáticos para vehículos marinos hasta los modernos sistemas de estabilización en posición y orientación, seguimiento preciso de trayectoria o de posicionamiento dinámico. Además al ser los vehículos marinos en su mayoría sistemas subactuados, el control auto-



Barco de pasajeros.

mático se transforma de hecho en un ingrediente de obligada presencia en cualquier hidronave, y cobra una importancia especial en todo lo referido a su maniobrabilidad y seguridad, tanto en vehículos ordinarios de superficie tripulados, como en navegación submarina o en vehículos marinos sin intervención humana (UMVs)

Por otra parte, algunas innovaciones tecnológicas que marcan tendencia en el campo de la construcción naval, entre las que merece mencionar por ejemplo el empleo de motores superconductores para propulsión de buques, también llevan aparejado un esfuerzo centrado en torno al control de los nuevos dispositivos (Jiang et al., 2007). Aunque los ensayos reales de este tipo de propulsores aún se circunscriben principalmente al ámbito militar (por ejemplo en enero de 2009 fue probado con notable éxito un motor superconductor de 36,5 MW en un buque de la armada estadounidense), sus ventajas en cuanto a tamaño, masa, eficiencia, robustez y densidad de potencia los hacen candidatos ideales para su futuro empleo generalizado también en el ámbito civil y mercante. Previsiblemente el control automático, silenciosamente una vez más, será pieza clave en el posible éxito de estas tecnologías.

3.2. Robótica y mecatrónica

La robótica se ha convertido en una disciplina por sí misma, independiente ya del control automático, pero que, sobre todo en sus orígenes, no puede entenderse sin él. Muchos de los primeros trabajos investigadores e industriales en robótica tenían como ingrediente esencial lazos de control automático, y fueron desarrollados por ingenieros de control con interés en dispositivos mecánicos que de alguna forma imitaran el comportamiento humano. Un claro indicador de estos orígenes comunes es la fundación en los años ochenta del siglo XX de la IEEE Robotics and Automation Society, conjuntamente entre la IEEE Control Systems Society y la IEEE Computer Society. Aún hoy día los lazos de control automático forman parte integral esencial de los sistemas robóticos y mecatrónicos actuales.

3.2.1. Manipuladores y máquina herramienta

Históricamente los robots manipuladores y las máquinas-herramienta de control numérico son los elementos precursores de los sistemas industriales robotizados actuales, que se han desarrollado muy fuertemente, en particular aplicados a algunos sectores productivos concretos como por ejemplo el de la automoción. Desde que en los años sesenta del siglo XX se instalara en la planta de General Motors en Trenton, New Jersey el primer manipulador mecánico industrial (Mickle, 1961) (fabricado por Unimation, funda-

da por Joseph Engelberger, en colaboración con George Devol) se ha recorrido mucho camino en los sistemas de fabricación flexible.

El control automático ha sido absolutamente clave y parte integral imprescindible en este desarrollo, sobre todo desde la popularización de los sistemas de control por computador que permitieron tratar la cuestión del guiado de mecanismos como un problema general de control de un sistema dinámico, de naturaleza mecánica en este caso, pero esencialmente equivalente desde el punto de vista del control automático a cualquier otro de otra naturaleza física.



Brazo manipulador ABB.

Gran parte de los avances y me-

joras hacia los que se dirigen los manipuladores y las máquinas-herramienta industriales en la actualidad tienen en el control automático un compañero de viaje ineludible: cuestiones importantes como el aumento en las aceleraciones y velocidades de los mecanismos, incremento en el rango de velocidades que se pueden utilizar, la alta precisión (inferior a la micra) en posicionamiento, orientación o velocidad, generación de altos pares de fuerza o supresión de vibraciones son problemas todos ellos para cuya solución el control automático es protagonista.

Los manipuladores para robótica médica son también un campo de enorme potencial de crecimiento, pero que aún no ha despegado del todo. El famoso robot da Vinci (Slack, 2007) (fabricado por la compañía californiana Intuitive Surgical) para asistencia de cirugía básicamente es un instrumento teleoperado con servos y lazos de realimentación de fuerza. Sin embargo simplemente teniendo en cuenta el escaso número de robots médicos aprobados para su uso clínico real, resulta evidente que aún hay mucho camino por recorrer en todo lo referido a la seguridad, utilidad y fiabilidad de estos dispositivos, en cuyo desarrollo trabajan muchos ingenieros de control en colaboración con médicos y cirujanos.

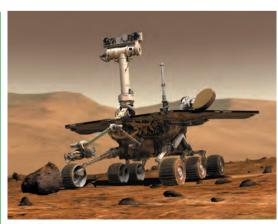
3.2.2. Electromecánica de precisión

La tendencia a la miniaturización de procesos y sistemas y la importancia creciente de la nanociencia y la nanotecnología da lugar a la necesidad de sistemas mecatrónicos de alta precisión, a escalas antes no alcanzadas. Cualquier dispositivo actual o futuro dentro de este ámbito requiere de lazos de control automático para alcanzar altas precisiones a escala micrométrica o nanométrica. Un ejemplo actual bien conocido es el microscopio de fuerza atómica (Meyer et al., 2004), que permite explorar a escala atómica y que por tanto requiere de posicionadores (normalmente piezoeléctricos) de precisión nanométrica para el cabezal de lectura.

No sólo en aplicaciones dirigidas a explorar lo más pequeño es necesaria la precisión nanométrica. También en dispositivos de grandes dimensiones dedicados a explorar lo más grande, como por ejemplo los modernos telescopios astronómicos se requieren posicionadores de precisión micrométrica para los segmentos de sus espejos. Esta tendencia es cada vez más exigente, y por ejemplo, en las especificaciones para los posicionadores de los segmentos del futuro *European Extremely Large Telescope* (E-ELT Science Working Group, 2006) se requieren precisiones de 5 nanómetros. Resulta evidente que el control automático es elemento indispensable para encarar estos logros tecnológicos con éxito.

3.2.3. Robots móviles e inteligentes

A pesar de que la robótica en su poco más de medio siglo de vida se ha convertido en una ciencia interdisciplinar por derecho propio y ha alcanzado un gran nivel de desarrollo, no cabe duda de que si se entiende que un robot debe ser un dispositivo que imite al ser humano y se relacione con él de igual a igual, aún queda mucho por hacer y en este sentido puede decirse que todavía nos encontramos en los inicios de la ciencia robótica.



Mars Rover.

Hoy día los robots móviles, gracias en buena parte al control automático y a la inteligencia artificial, son capaces de moverse de forma autónoma en tierra, mar y aire, crear mapas con capacidad de autolocalización, realizar tareas cooperativas o relacionarse con humanos, por mencionar algunas funciones complejas. Sin embargo aún queda mucho por hacer para mejorar sus capacidades en

cuanto a integración e interpretación de información multisensorial, adaptación, razonamiento, aprendizaje, decisión y control a alto nivel, e incluso movilidad en entornos típicamente humanos y desestructurados, si se pretende que realmente el robot imite a las personas y sea comparable a ellas en todas estas funciones. Una vez más, estos avances no serán posibles sin el concurso esencial del control automático.

3.3. Grandes instalaciones

Bajo el nombre de grandes instalaciones pueden agruparse un buen número de complejos o centros altamente automatizados dedicados a actividades diversas a gran escala, entre las que pueden destacarse, por ejemplo, las plantas de producción industrial (singularmente las químicas), las centrales para generación de energía, o los grandes laboratorios científicos (como por ejemplo los aceleradores de partículas). Cualquiera de estos grandes centros tiene usualmente decenas de miles de variables medibles y miles de lazos de control y supervisión, de los cuales depende críticamente el correcto funcionamiento de la instalación. Ello pone de relieve la importancia fundamental del control automático en este contexto.

3.3.1. Plantas de producción industrial

Las plantas químicas, petroquímicas y por extensión otras instalaciones, por ejemplo de las industria cementera, o farmacéutica, son centros de producción semi-continua en



Refinería.

las que el control automático tiene ya una larga tradición de exitosa aplicación, que a lo largo de décadas ha permitido mejorar múltiples aspectos, tanto en cuestiones de incremento de producción y calidad, como de reducción de costes, sistemas de seguridad o de protección del medio ambiente. En estas factorías el control forma parte integral e indivisible de la instalación.

Desde la implantación a finales de los años cincuenta del siglo XX del que pasa por ser el primer sistema de control digital de la historia del control de procesos, basado en el computador (Thompson) Ramo-Wooldridge 300 (Dyer, 1998) (en la refinería de Texaco en Port Arthur, Texas, que tenía capacidad para medir 104 variables y controlar 5 lazos digitales y 9 analógicos), se han introducido con éxito muchos elementos de automatización en las plantas de producción industrial. Hoy en día conviven en este entorno de forma habitual múltiples sistemas de control distribuido, con controladores programables, interconexiones y buses de campo e incluso algunos elementos de control menos clásicos, fuera de los omnipresentes lazos de control PID, entre los que cabe destacar algunos controles de tipo predictivo (Qin y Badgwell, 2003).

Todo parece indicar que la importancia del control automático en las plantas de producción industrial no hará más que aumentar en el futuro. Cuestiones como la decisión y control en procesos híbridos (en los que se mezclan elementos de naturaleza continua y discreta), o en los que el objetivo de control se define de forma compleja en función del producto, en términos de señales no directamente medibles, o problemas de control en red (El-Farra et al., 2005) son cuestiones de enorme interés, directamente ligadas al control automático, cuyo desarrollo redundará sin duda en mejoras fundamentales en la producción industrial del futuro.

3.3.2. Centrales de generación de energía

El sector energético es percibido como estratégico tanto por los gobiernos como por el público en general, tanto más desde la crisis del petróleo de los años setenta del siglo XX, y con la concurrencia de diversos factores adicionales, como la creciente demanda de energía de todas las economías mundiales (muy particularmente las emergentes), u otras cuestiones que han ido calando en la opinión pública, como por ejemplo la creciente preocupación por el medio ambiente. Las grandes centrales de generación de energía, fundamentalmente las térmicas y las nucleares, pero también los parques eólicos y solares, dependen de manera fundamental del control automático para su funcionamiento de forma eficiente, segura y limpia.

En las centrales térmicas, tanto el rendimiento de las calderas, de las turbinas como la regulación de la tensión eléctrica y de la potencia reactiva requieren de un alto número



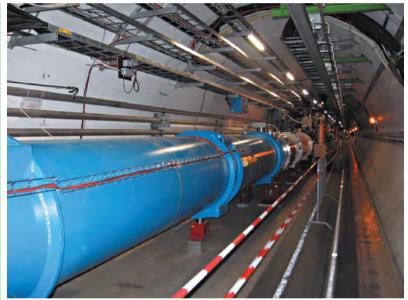
Central nuclear.

de lazos de control, tanto a bajo nivel de variables individuales medibles como a alto nivel de integración y supervisión global. De forma adicional a lo anterior, en las centrales nucleares aún es más evidente la necesidad de sistemas de control automático: la propia reacción en cadena neutrónica iniciadora de todo el proceso debe moderarse con las así llamadas «barras de control», actualmente típicamente construidas con aleaciones de plata-indio-cadmio, que absorben el flujo de neutrones. Es fácil de enfatizar y explicar de forma sencilla al público en general la absoluta necesidad y el papel central y esencial del control automático en este contexto sin más que notar que la diferencia entre una reacción en cadena controlada y otra no controlada es la misma que existe entre una central para generación de electricidad y una bomba nuclear.

Los sistemas de generación de energía siguen evolucionando actualmente en buena parte por avances en su control, tanto a nivel de mejoras en la transducción de la energía (los aerogeneradores, en continuo desarrollo, son un buen ejemplo de esto), como en la regulación de los sistemas eléctricos y electrónicos de potencia, subsistemas cuyo rendimiento y prestaciones se han visto últimamente beneficiados por la incorporación de algunos métodos no lineales de control (Sira-Ramírez y Silva-Ortigoza, 2006). Finalmente, en todo lo referido a sistemas de protección y de reducción de emisiones contaminantes en las centrales de generación de energía, los lazos de control automático han cobrado una importancia capital.

3.3.3. Grandes instalaciones científicas

Los grandes laboratorios científicos como por ejemplo las fuentes de radiación sincrotrón, las fuentes de neutrones por espalación, los laboratorios de física de partículas, los centros de fusión nuclear o hasta incluso los modernos grandes telescopios astronómicos, son probablemente las instalaciones donde mejor se observa cómo opera la simbiosis entre ciencia y tecnología. De forma ordinaria, es la aplicación de la ciencia básica la que normalmente permite después el desarrollo de nueva tecnología, pero en estos grandes laboratorios es la tecnología la que es puesta a prueba al servicio del avance de la ciencia básica, cerrando un círculo de mutuo beneficio.



Acelerador de partículas del CERN.

Históricamente probablemente el ejemplo más prominente de aplicación de los principios de la realimentación en el ámbito de los aceleradores de partículas se encuentra en la invención del llamado «templado estocástico» (stochastic cooling) de haces. Esta idea, concebida a finales de los años sesenta del siglo XX por el ingeniero holandés Simon van der Meer, es fundamentalmente un método de control de emitancia de haz (distribución espacial de las partículas en el plano fásico), que de forma natural tiende a expandirse por la mutua repulsión de partículas de igual carga, y que se corrige con un electroimán (kic-ker) accionado mediante un lazo de realimentación proveniente de un medidor de emitancia. El consiguiente aumento de la densidad de partículas en el espacio fásico a que condujo la implementación real del templado estocástico supuso una mejora esencial en la eficiencia de los colisionadores de partículas, la cual entre otras cosas permitió obser-

var en 1983 los bosones W y Z (transmisores de la fuerza electro-débil). Todo ello valió a Simon van der Meer y Carlo Rubbia el Premio Nobel de Física en 1984. La lección Nobel dada por Van der Meer (Van der Meer, 1984) es altamente ilustrativa respecto al papel esencial de los principios de la realimentación en la consecución de este importante logro.

El control automático es pieza clave en cualquier gran instalación científica, tanto a nivel del gobierno de componentes individuales como en la escala superior de integración y coordinación de toda la instalación. Un reciente ejemplo de esta importancia pudo percibirse recientemente el 10 de Septiembre de 2008 en la febril actividad en sala de control del *Large Hadron Collider* del CERN (Ginebra) durante el primer encendido del colisionador (Cartwright, 2008). Las sucesivas actualizaciones de todas estas grandes instalaciones científicas en general tienden a requerir aumentos de prestaciones en múltiples aspectos de sus elementos esenciales, como por ejemplo precisión micrométrica en guiado, enfocado y emitancia de haz, incremento en energía (en el rango de los TeV) y corriente de partículas (cientos de mA), confinamiento de plasma, o sincronización (rango de ns) de campos acelerantes de radiofrecuencia de cientos de MHz y varios MW de potencia, entre muchas otras características para cuya resolución se requiere la presencia de forma obligada de múltiples lazos de realimentación para empujar a sus límites la tecnología disponible (Minty y Zimmermann, 2003).

3.4. Control de redes y sobre redes de comunicación

Las comunicaciones digitales han modificado profundamente la aplicación de los sistemas de control automáticos, por una parte permitiendo que el cálculo de la ley de control pueda llevarse a cabo en un entorno distribuido, es decir que puedan realizarse los cálculos en diversos computadores interconectados y con capacidad de redundancia para evitar posibles fallos en alguno de los computadores. Por otra parte, las comunicaciones digitales crean unos tiempos de retardo variable e impredecible en el envío y recepción de los datos por sus redes de comunicaciones, lo cual obliga a una ejecución de los algoritmos de control en forma parcialmente asíncrona, es decir sin un control fijo del tiempo en que se ejecutan los mismos. Esta nueva situación crea la necesidad de desarrollar nuevos paradigmas para diseñar algoritmos robustos y eficientes de control que tengan en cuenta la incertidumbre de los retardos de las redes de comunicaciones digitales. Entre las nuevas aplicaciones de control automático que permite el gran desarrollo de la tecnología de las comunicaciones digitales, se pueden señalar el control automático de redes y el control automático sobre redes.

3.4.1. Control de redes de comunicación

Hay ya muchos ejemplos de esta nueva clase de sistemas que se están desarrollando como el control de la congestión en Internet, el control de la alimentación energética de dispositivos de comunicaciones sin cables o la utilización en tiempo real de la información para controlar cadenas de suministro, etc. En todos estos sistemas, la interacción de flujo de información con la física subyacente es la responsable del resultado global obtenido.

Otro ejemplo importante es el problema de control de las redes de transporte y distribución de agua potable en entornos urbanos. Garantizar la calidad del agua en origen y controlar su evolución durante la distribución es asunto de capital importancia. Minimizar los cambios de los parámetros de calidad del agua exige optimizar los flujos y reducir al máximo los tiempos de residencia del agua en la red. Un primer paso en mejorar la gestión de agua es monitorizar los parámetros de la red que actualmente no se supervisan debido a dificultades de coste y de implementación con sistemas de medida tradicionales (demanda, pérdidas, calidad). En esta línea, la sensorización y una computación distribuida permiten monitorizar y controlar sistemas físicos distribuidos mediante redes cableadas y/o inalámbricas. La mejora de la información es la base para poder tomar decisiones en el modo de operación que optimicen el gasto energético y reduzcan las pérdidas de agua mientras garantizan el suministro adecuado a los consumidores en cantidad y calidad a pesar de las demandas cambiantes. El control automático se beneficia de los avances en computación y comunicaciones para poder abordar procesos complejos como los que intervienen en los sistemas de gestión de agua. No obstante, la red de información puede introducir nuevos transitorios, interferencias, imprecisión en las medidas que pongan en riesgo la estabilidad o las prestaciones de la red de agua.

3.4.2. Control sobre redes de comunicación

Si hasta hoy en día los avances de la tecnología de la información han conducido a un intenso intercambio global de información gracias a Internet, el futuro próximo pasa por interaccionar los sistemas de información con los sistemas físicos. Las redes de nodos sensoriales o de accionadores con capacidad de computación y control, conectados físicamente por cable o sin él, pueden formar una orquesta heterogénea que controla todo el entorno físico del sistema. Ejemplos de control sobre redes de comunicación son los actuales automóviles, las casas y edificios modernos, los grandes sistemas de fabricación, el control inteligente de autopistas y de infraestructuras urbanas (trenes, metros, autobuses). Por ello parece claro que la nueva fase de crecimiento de la tecnología de la información pasa por la convergencia de la comunicación, computación y control (la triple C).

Esta nueva disciplina que integra de forma descentralizada la triple C con los sistemas físicos a controlar ha sido denominada de variadas formas, pero hoy día se impone la denominación inglesa de Networked Control Systems (NCS). Un claro indicador del gran interés que despierta actualmente este campo se encuentra en los extensos números especiales que varias de las principales revistas de control (IEEE Transactions on Automatic Control en septiembre de 2004; Proceedings of the IEEE en enero de 2007; IEEE Control Systems Magazine en agosto de 2007) han dedicado monográficamente a presentar una panorámica de la investigación que se está desarrollando en torno a los NCS. Muchas líneas y aplicaciones están abiertas y en rápido desarrollo actualmente, tanto alrededor de las diferentes estrategias de control y la cinemática de accionadores o vehículos adecuados para implementar NCS, como en torno al estudio de la estructura de red necesaria para garantizar canales de comunicación fiables, seguros y de suficiente ancho de banda o desarrollo de protocolos de comunicación adecuados para sistemas de control. Aspectos como la captación de datos en tiempo real en red usando sensores distribuidos, el procesado eficiente de la información captada o el estudio de estabilidad y robustez de los controles en presencia de retardos o pérdida de paquetes en la red son también cuestiones de primera importancia, que marcan tendencia en este campo, y que en muchos casos requieren refundar los propios fundamentos de la teoría de control (Matveev v Savkin, 09).

3.5. Microsistemas, sistemas moleculares y sistemas cuánticos

El siglo XXI es el siglo de la nanociencia. El interés por lo muy pequeño se extiende a todas las ciencias y tecnologías asociadas, incluyendo la física, química, biología molecular, medicina, sistemas electrónicos, ópticos y mecánicos. Los principios del control automático y de la realimentación son perfectamente aplicables a sistemas descritos a micro y nano escalas, independientemente de que los fenómenos físicos que rigen en el reino de los nanómetros son diferentes de los del mundo macroscópico. El control automático a escala molecular está posiblemente llamado a desempeñar un papel fundamental en la mejora de prestaciones y desarrollo de los nanosistemas de una forma general, de forma análoga a como ha ocurrido con los sistemas a escala ordinaria en los tres cuartos de siglo de existencia de la automática moderna.

3.5.1. Sistemas microelectromecánicos (MEMS)

Los MEMS (*micro electromechanical systems*) han experimentado un importante desarrollo en los últimos veinte años, coincidiendo con la creciente capacidad tecnológica de integrar en un único sustrato de silicio de un microchip tanto la electrónica del dispo-

sitivo como diferentes elementos mecánicos, sensores y accionadores. Desde los inicios de la tecnología micro electromecánica, se concibió la electrónica del dispositivo como su «cerebro», para controlar el resto de elementos sensores, mecánicos o accionadores a modo de «ojos» y «brazos» en un sistema integrado (*system-on-a-chip*). El control automático de MEMS, por tanto, es un elemento integral de esta tecnología desde su propia creación.

Sin embargo, la implementación de realimentación para gobernar accionadores en MEMS (sean de tipo magnético, piezoeléctrico, térmico, óptico o electrostático) no se ha desarrollado tanto como podría preverse teniendo en cuenta la relativa antigüedad de la tecnología, fundamentalmente por interés en mantener lo más simple posible los dispositivos, además de por limitaciones en la disponibilidad de datos de los sensores, la presencia de ruido y dinámica sin modelar en los sensores, y típicamente por la muy rápida dinámica en los accionadores. En este sentido, los MEMS se han gobernado tradicionalmente en lazo abierto y aplicando simples señales de control (Jensen et al., 2003). Sin embargo la progresiva necesidad de mejores prestaciones tanto en precisión como en velocidad de respuesta ha conducido de manera indefectible a la aplicación de los métodos del control automático en los MEMS.

Por una parte, mediante el modelado de la dinámica del microsistema puede diseñarse una señal de control a medida (pre-shaped control) para mejorar la respuesta del sistema. Esta técnica ha dado buenos resultados en desarrollos recientes, pero no deja de ser un control en lazo abierto, que no compensa las inconsistencias de fabricación, la falta de repetibilidad en los parámetros del dispositivo, la falta de modelos dinámicos precisos del microsistema o las posibles perturbaciones. Para aprovechar los bien conocidos efectos beneficiosos de la realimentación y reducir la sensibilidad a estos factores el paso lógico es implementar un verdadero control en lazo cerrado. Estas mejoras ya han sido implementadas recientemente con éxito en sensores MEMS realimentados con el fin de mejorar la precisión de medida, y en algunos dispositivos ópticos (Bryzek et al., 2003). Se trata de un camino prometedor que probablemente no ha hecho más que empezar.

3.5.2. Sistemas moleculares y cuánticos

Las leyes físicas de lo muy pequeño (moléculas y átomos) son las de la mecánica y electrodinámica cuántica. Son diferentes a las que funcionan en el mundo macroscópico, pero en principio no existe ninguna razón para poder aplicar los principios del control automático también para el control de nanosistemas. Las dificultades principales que surgen a la hora de controlar procesos a nivel molecular o atómico se deben a las reducidas dimensiones de los objetos a controlar y a la elevadísima velocidad de los procesos en la escala nanométrica. Las distancias interatómicas medias son del orden del

nanómetro, las velocidades de los átomos y moléculas a temperatura ambiente son cercanas al kilómetro por segundo y el período de los modos normales de oscilación de las moléculas son del orden de las decenas de femtosegundos (1 fs=10⁻¹⁵ s). Hasta recientemente el desarrollo de dispositivos para medida y control en estas escalas estaba seriamente limitado por la tecnología disponible.

El panorama cambió a finales de la década de los ochenta del siglo XX con el desarrollo de láseres ultra rápidos, capaces de generar pulsos de pocos femtosegundos (Paschotta, 2008). El químico egipcio Ahmed H. Zewail recibió en 1999 el Premio Nobel de Química por su desarrollo de la espectroscopía láser de femtosegundos, fundamentalmente por un experimento de control a nanoescala que realizó diez años antes: Zewail usó un láser de femtosegundos a modo de sensor para medir una reacción química en un tubo de vacío y un segundo láser ultra rápido a modo de accionador para suministrar energía a dicha reacción. Aunque originalmente el lazo de control se cerraba manualmente y básicamente el experimento se diseñó para poder observar una reacción química que dura pocos femtosegundos (Zewail, 2000) (y de paso fundar la Femtoquímica), la simple posibilidad de medir y actuar a nivel molecular permite abrir el camino al nanocontrol.

Aunque apenas existen ejemplos experimentales de control de sistemas moleculares, la modulación de los pulsos de los láseres ultra rápidos (normalmente mediante cristales líquidos o moduladores acustico-ópticos) para poder actuar de forma muy variada sobre sistemas moleculares, sí se ha demostrado experimentalmente. Por otra parte, la propia espectroscopía ultra rápida de Zewail usando varios láseres de diferentes frecuencias proporciona múltiples maneras de medir los nanosistemas. Ello ha abierto nuevas posibilidades de cambiar las propiedades físico-químicas de sistemas moleculares usando estrategias basadas en ideas del control automático, incluyendo control de modelo inverso o control óptimo (Chen et al., 1997). Es evidente que aún queda mucho camino por recorrer para que el control automático de nano sistemas sea una realidad útil plenamente establecida, pero esto no debe sorprender si se tiene en cuenta que las propias nanotecnologías a las que podría servir son jóvenes aún y deben todavía madurar en un futuro próximo.

3.5.3. Biotecnología

El control de procesos está adquiriendo una importancia cada vez mayor en las industrias de biotecnología debido a los nuevos desarrollos de sensores que permiten caracterizar y modelizar el comportamiento intracelular. Además el control clásico de biorreactores se centraba en el control del tiempo de residencia, dosificación del nutriente y condiciones ambientales de los reactores (agitación, temperatura, pH, etc.) en respuesta a las medidas directas o indirectas del sistema (oxigeno disuelto, temperatura, pH, con-

centración de metabolitos, etc.). Los avances actuales en sensorización permiten la medida directa de los mecanismos intracelulares. También los avances recientes en el modelado cuantitativo de bioprocesos posibilitan una comprensión más minuciosa de los procesos bioquímicos subyacentes. Todo ello permite aumentar los objetivos de control en nuevos procesos biotecnológicos, como por ejemplo el control de proteínas recombinadas para reproducir enzimas. Típicamente, los genes que corresponden al producto deseado se introducen al microorganismo a través de un plasmodio. La primera fase en la producción de la proteína recombinada implica aumentar la productividad de células (concentración de biomasa) y en una segunda fase, una vez alcanzada la concentración de biomasa deseada se introducen los genes para sintetizar las nuevas proteínas. El uso de estas proteínas está revolucionado la biología experimental (Murray, 2002) permitiendo monitorizar en tiempo real la localización y las interacciones intracelulares, las cuales son la clave para determinar la función y las interacciones de un gran número de proteínas.

3.5.4. Control molecular

El control molecular de sistemas a nivel nano escalar está concitando un gran interés gracias a los nuevos desarrollos de instrumentación a nano escala, para medir y actuar en esta escala. Recientes progresos en modelos físicos y químicos están permitiendo realizar simulaciones predictivas del comportamiento dinámico de materiales a nivel nano escalar, desde nano partículas hasta semiconductores y materiales con nano estructuras.

Con el conocimiento físico de los modelos matemáticos ahora es posible formular la optimización y el control de materiales y sistemas a nano escala. Las aplicaciones incluyen el diseño de materiales microscópicos, la medida con precisión nanométrica, y el tratamiento de la información cuántica.

Los materiales macroscópicos eran, y son, bien descritos y conocidos por sus propiedades másicas y volumétricas, en cambio cuando la estructura de los materiales desciende a nivel microscópico su comportamiento ya no queda bien definido por estas propiedades y no capturan comportamientos físicos relevantes.

Los efectos superficiales incrementan su importancia y alteran sus propiedades electrónicas. Estas nuevas propiedades pueden ser utilizadas en una gran variedad de aplicaciones de ingeniería, desde punteros de láser cuánticos hasta superficies ultra duras. Un reto importante es la utilización de estos comportamientos en el diseño y fabricación de materiales a escala nanométrica. Esta área de trabajo tiene un gran futuro con muchos problemas abiertos, aun por descubrir, desde nuevos modelos de comportamiento de sistemas a escala nanométrica, la integración de las medidas de estos múltiples sensores

nanométricos, hasta el diseño de micro o nanocontroladores que permitan controlar estos fenómenos. Todo esto representa un desafío para la comunidad de control automático.

3.6. Economía y econometría

Los sistemas económicos mundiales están altamente realimentados a distintos niveles, y en una economía global como en la que vivimos todas las variables económicas del planeta se interconectan entre sí en un complejo sistema dinámico no lineal y posiblemente caótico. Es difícil no ver por tanto la directa relación que los métodos del control automático tienen con los sistemas económicos, principalmente en todo lo referido al análisis, pero también al diseño de sistemas dinámicos y de control. Desafortunadamente, al tratarse la economía y econometría de ciencias a medio camino entre las ciencias clásicas y las sociales, en ellas se mezclan variables económicas bien medibles y leyes económicas formulables matemáticamente con notable precisión con fenómenos relacionados con el comportamiento de las personas, que normalmente escapan de una descripción matemática precisa (la Psicohistoria de Hari Seldon es una excepción a esto, desgraciadamente ficticia (Asimov, 1951-1953)).

3.6.1. Modelos económicos realimentados y control de variables económicas

Desde hace décadas los econometristas han tratado de modelar matemáticamente sistemas económicos inherentemente complejos utilizando herramientas bien conocidas para los ingenieros de control, como las ecuaciones diferenciales, la teoría de optimización o los procesos estocásticos (Brock y Malliaris, 1989). Algunos éxitos con repercusión práctica notable, como por ejemplo el modelo en derivadas parciales que Fisher Black y Myron Scholes desarrollaron (Black y Scholes, 1973) y que Robert Merton empleó para estimar el valor actual de opciones de compra o venta de acciones futuras, dejaron claro ya en los años setenta del siglo XX que el modelado de sistemas económicos era posible no sólo en teoría, sino que podía funcionar también en la práctica. Ello les valió el Premio Nobel de Economía en 1997.

Debido a la evidente interconexión que las dinámicas de distintos subsistemas económicos presentan, tanto hacia adelante (feedforward) como hacia atrás (feedback), los modelos económicos han ido evolucionando y actualmente incluyen realimentación implícita o explícitamente, para explicar distintos fenómenos observados. Para un ingeniero de control es altamente ilustrativo observar por ejemplo el uso de realimentación

positiva de variables en los modelos económicos para explicar efectos de inestabilidad o volatilidad de mercados (Sun et al., 2008).

Los métodos del control automático pueden aplicarse a los modelos económicos y ser útiles en múltiples aspectos, aunque dada la naturaleza tan dispar de los sistemas dinámicos típicos en ingeniería de control y los sistemas de tipo económico, aún parece necesario mucho trabajo de adaptación entre ambos mundos. Entre otras líneas prometedoras de avance pueden citarse las técnicas de identificación de parámetros basadas en datos experimentales, y especialmente la identificación estocástica. En relación con ello, la predicción es un aspecto de extraordinaria importancia y prácticamente la razón de ser de la econometría. Parece por tanto claro que en el contexto del control automático los métodos de tipo predictivo deben ser una poderosa herramienta.

Otra cuestión abierta es la falta de robustez de los lazos de decisión y control en economía, fundamentalmente por las enormes incertidumbres a que están sometidas las variables. Las técnicas de control robusto, diseñadas explícitamente para ser resistentes a errores de modelado e incertidumbres, deberían claramente poder aportar luz en estas cuestiones. Finalmente, al ser los sistemas económicos complejos sistemas dinámicos no lineales con efectos típicamente no lineales medibles (múltiples puntos de equilibrio, ciclos límite e incluso comportamiento caótico), la teoría de control no lineal debería poder llegar a aportar soluciones para problemas económicos formulables en términos matemáticos, como por ejemplo la predicción, supresión o estabilización de ciclos límite de indicadores económicos, o el control de variables económicas caóticas.

4

Situación de la industria española respecto al control automático

En los capítulos anteriores se ha ido comentado cuál es el objetivo del control automático y en qué productos y aplicaciones se encuentra. Se ha puesto de manifiesto que determinados productos, equipos e instalaciones requieren la incorporación del control automático para ofrecer las funcionalidades y el nivel de prestaciones de que disponen. En este capítulo se va a tratar, por una parte, de situar el peso del control automático en el desarrollo económico e industrial en España y, por otra, a poner de manifiesto la importancia que tiene el control automático en la industria; es decir, hasta qué punto es utilizado en la producción industrial en España. En ambos casos se va a extender el análisis para comparar la situación en España con respecto a la de otros países de referencia o del entorno.

El Instituto Nacional de Estadística (INE) ofrece datos sobre empresas y comercio exterior, industria, investigación y desarrollo tecnológico, y también sobre nuevas tecnologías de la información y la comunicación, entre otros campos. Para focalizarse en el ámbito industrial se dispone de la Encuesta Industrial de Empresas (EIAE), que se realiza con periodicidad anual y que se centra fundamentalmente en la cifra de negocio, distribución de ingresos y gastos en grandes partidas, e inversión y distribución de ventas, incluyendo exportación. Así pues, solamente se puede valorar de forma directa el peso que tienen, dentro de la industria española, los sectores industriales de tecnología alta, el nivel de su inversión y la importancia de los mercados internacionales.

Algo semejante ocurre con los estudios e informes del Sistema Integral de Seguimiento y Evaluación (SISE), que tienen por misión ofrecer información sobre el estado de del sistema científico-tecnológico español y su evolución más reciente.

Otra fuente importante de información la constituye los informes anuales Cotec sobre tecnología e innovación en España, que se vienen realizando desde 1996, y tienen como objetivo aportar una recopilación de indicadores sobre la situación de la innovación y la tecnología en España y su posicionamiento respecto a los países de su entorno. En el *Informe Cotec* 2008 se dedica un capítulo a *Tecnología y Empresa*, en el que se presentan las características más relevantes del gasto en investigación y desarrollo tecnológico así como en innovación, ejecutado por las empresas españolas; se realiza además el análisis y comparación de la situación de España con la de la Unión Europea y con la internacional.

Se puede establecer, con un margen pequeño de error, que el sector industrial de las Tecnologías de la Información y de las Comunicaciones (TIC), originado por la convergencia tecnológica entre las áreas de Informática, Telecomunicaciones y Electrónica, está íntimamente vinculado al control automático. Los avances y desarrollos en control automático inciden por un lado directamente en el sector de las TIC y de forma indirecta, posibilitando o facilitando la incorporación de avances en otras disciplinas que intervienen en las TIC. Esta área es realmente un sector compuesto por subsectores que han sido clasificados por la OCDE como de «Tecnología Alta» ya que requieren un continuo esfuerzo en investigación y una sólida base tecnológica. No sólo se trata de un sector con importancia estratégica para la competitividad de todos los sectores industriales, ya que posibilita el aumento de la productividad gracias a una explotación más eficiente de los factores de producción, sino que también son tecnologías de gran impacto social (tecnologías horizontales). La relevancia política del sector ha quedado reflejada, por un lado, en su inclusión como objetivo de desarrollo dentro de los Planes de Investigación a todos los niveles como área científico-tecnológica prioritaria y, por otro, se ha incluido en los principales informes internacionales sobre indicadores de Ciencia y Tecnología en los últimos años.

Dado que no se disponen de estadísticas oficiales relativas al control automático, se ha considerado pertinente valorar su importancia en los sectores de tecnología alta (usuarios de tecnología alta) y en los productos considerados de tecnología alta (que incorporan tecnología alta). A partir de ahí se puede tratar de extraer conclusiones de las estadísticas disponibles sobre la implantación y evolución de estos sectores y productos en España.

4.1. El control automático en los sectores de tecnología alta

Tras presentar brevemente los sectores considerados de tecnología alta se va a hablar del control industrial como control de procesos, control de máquinas y control de sistemas integrados. En cada caso se destaca la importancia del control automático, los beneficios que éste aporta y la incidencia en cada uno de los sectores considerados de tecnología alta.

Se conoce como tecnología alta aquella que se caracteriza, al mismo tiempo, por su complejidad y por una rápida renovación de conocimientos. Ello requiere una sólida base tecnológica y un esfuerzo importante y continuado en investigación. La relación de los sectores productivos y de servicios considerados de tecnología alta y la de los productos asociados es cambiante en el tiempo.

En España la determinación de sectores de tecnología alta y los productos de alta tecnología viene establecida por el INE, basándose en los trabajos realizados por la OCDE y las adaptaciones realizadas por EUROSTAT, trabajos que tienen en cuenta el valor y la evolución de un conjunto de indicadores establecidos para cada sector y para cada producto, así como el sector asociado para cada producto (Tabla 4.1). Cabe señalar que los términos «tecnología alta» y «alta tecnología» se utilizan aparentemente de forma indistinta. En este libro utilizamos preferentemente los mismos términos que emplea el Instituto Nacional de Estadística en sus tablas y publicaciones. Así, cuando hablamos de sectores manufactureros utilizamos el término «tecnología alta» y cuando hablamos de servicios o de productos aplicamos el término «alta tecnología».

	CLASIFICACIÓN CNAE-93						
CNAE	Sectores						
244 30 321 32-321 33 353	Sectores manufactureros de tecnología alta Industria farmacéutica. Maquinaria de oficina y material informático. Componentes electrónicos. Aparatos de radio, TV y comunicaciones. Instrumentos médicos, de precisión, óptica y relojería. Construcción aeronáutica y espacial.						
24-244 29 31 34 35-353	Sectores manufactureros de tecnología media-alta Industria química excepto industria farmacéutica. Maquinaria y equipos. Maquinaria y aparatos eléctricos. Industria automóvil. Construcción naval, ferroviaria, de motocicletas y bicicletas, y de otro material de transporte.						
64 72 73	Servicios de alta tecnología o de tecnología punta Correos y telecomunicaciones. Actividades informáticas. Investigación y desarrollo.						

Tabla 4.1. Clasificación de los sectores considerados de tecnología alta y media-alta (Fuente: INE).

4.1.1. Control industrial

Hablar de control automático en los sectores de manufactura supone hablar de control de procesos, control de máquinas y de control de sistemas, incluyendo lo que comúnmente se denomina automatización. Por ello en este apartado se van a presentar algunos de los diferentes elementos de control que se pueden encontrar en los procesos industriales, en las máquinas y en las empresas.

Control en los procesos industriales

Los procesos industriales se clasifican en: discretos, por lotes (*batch*) y continuos. De forma sucinta sus principales características son las siguientes:

- 1) Procesos discretos: se corresponden normalmente con la producción de piezas discretas; encadenan un conjunto de operaciones más o menos automatizadas cada una de ellas, y suponen un flujo de materiales (materias primeras, semielaborados y productos finales) entre las diversas estaciones de trabajo y almacenes. La automatización de este tipo de procesos conlleva la mecanización de las tareas realizadas en cada estación de trabajo así como el seguimiento y control de los flujos de materiales. Este tipo de proceso es habitual en todos los sectores citados en la tabla 4.1 con excepción de la industria farmacéutica.
- 2) Los procesos por lotes se realizan básicamente en una estación de trabajo y se caracterizan por la realización de un proceso asociado a la estación con una variedad de ingredientes (materias primas) y recetas (secuencias de trabajo, tiempos, consignas, proporciones), así como la cantidad que se desea producir. La automatización del proceso supone la dosificación automática de ingredientes, el control de todo el proceso en la estación, y el control de un conjunto de tareas auxiliares como limpieza de conducciones y equipos, transporte de materiales, etc. Este tipo de proceso es habitual en la industria farmacéutica y alimentaria.
- 3) Los procesos continuos suponen la fabricación o el procesado de materiales sin interrupción. En este tipo de procesos el control automático garantiza la calidad y homogeneidad del producto resultante a pesar de las variaciones (perturbaciones) que puedan afectar a las condiciones de operación. Este tipo de procesos se encuentra en plantas de producción y sistemas de distribución de energía (térmica, nuclear, etc.), en la industria petroquímica, plásticos, producción y transporte de gas, entre otras.

En algunos sectores es fácil encontrar procesos híbridos, con más de un tipo de proceso de las características mencionadas.

Control en equipos y máquinas

Así como al hablar de control de procesos se hace referencia a la aplicación de la automatización en las industrias y empresas, al hablar del control de máquinas se indica la incorporación del control en los productos fabricados por empresas proveedoras de maquinas y líneas de producción. El control automático de máquinas se realiza actualmente mediante controladores de naturaleza programable, lo que supone normalmente no sólo la automatización de la operación de la máquina sino también la flexibilidad para trabajar con una variedad de productos (configuración) y la capacidad para comunicarse con otras máquinas o procesos (sincronización, supervisión, integración).

Las empresas que utilizan equipos y máquinas son usuarias del control automático y se benefician de su aplicación. Cuando se habla de empresas fabricantes de equipos y máquinas, la incorporación del control automático a sus productos supone mejorar sus características de funcionamiento y sus funcionalidades. A mayor nivel de control mayor valor añadido tiene el producto. La incorporación del grado de control automático requerido para un producto, de acuerdo con el segmento de mercado al que está dirigido, supone para la empresa fabricante disponer de un catálogo de productos más competitivos y de mayor valor añadido.

Control en la integración de sistemas

La aplicación generalizada de controladores digitales programables para la automatización de procesos y máquinas ha abierto la puerta a la automatización integral de todo el sistema «fábrica». A medida que se completa la automatización de máquinas y procesos en una empresa, y a medida que los computadores y controladores digitales se extienden por todas las secciones y departamentos de la misma, resulta más interesante y factible la integración de todos estos equipos y sistemas en la red que constituye el sistema de información de la empresa. Es lo que se denomina CIM (Computer Integrated Manufacturing). Esta denominación, inicialmente, correspondía a la integración de ingeniería, diseño y fabricación; actualmente se utiliza principalmente para denominar el sistema que automatiza la integración de las diferentes funciones y secciones de una empresa: diseño, comercial, planificación, compras, distribución, almacén, mantenimiento, producción, calidad y gestión, y también automatiza los flujos de información entre los diferentes departamentos (ver Figura 4.1).



Fig. 4.1. Pirámide CIM con los diferentes niveles de control en una empresa.

La estrategia CIM extiende el sistema de información de la empresa hasta los controladores de máquina en la planta de producción, es decir, automatiza los flujos de información entre todos los niveles. Por tanto, agiliza la disponibilidad de información, evita errores por manipulación de datos y permite disponer de herramientas útiles para la toma de decisiones a partir de información completa, fiable y actual: control de calidad, gestión de mantenimiento, planificación y control de la producción, mantenimiento de indicadores clave, etc. Una señal de su importancia es la existencia de la norma ISA 95, de la *International Society of Automation*.

La integración de sistemas es obligada en sectores como el alimentario y el farmacéutico ya que en ellos existen normas de obligado cumplimiento a este respecto. Una de ellas es la directiva 21 CFR, parte 11, con las exigencias de protección de registros y firmas electrónicas requeridas para una validación según la *Food and Drug Administration* (FDA). Otra es la obligación que establece el artículo 18 del Reglamento Europeo 178/2002 para todas las empresas del sector alimentario de disponer de un sistema riguroso y efectivo de mantenimiento de la trazabilidad en su cadena productiva.

4.1.2. Innovación, tecnología alta y control automático

Según el INE, en el periodo 2004-2006 el número total de empresas innovadoras fue de 4.040, lo que supone un 8,17% sobre el total de empresas (49.415). En ese periodo, las empresas innovadoras pertenecientes a los sectores de tecnología alta fueron 834, lo que representa un 14,8% sobre el total de empresas pertenecientes a los sectores de tecnología alta. Parece por lo tanto que existe una cierta correlación entre empresa innovadora y empresa de un sector de tecnología alta.

En los apartados anteriores se ha tratado de justificar la relación existente, en la práctica, entre empresas de un sector de tecnología alta y la utilización del control automático como elemento de mejora de la calidad, la productividad y, en definitiva, de la competitividad.

De alguna manera, aunque ser una empresa innovadora no supone que deba necesariamente pertenecer a un sector de tecnología alta, y el hecho de pertenecer a un sector de tecnología alta no es determinante para la utilización de sistemas de control automático para la automatización del proceso o del servicio, sí que existe una relación entre ser una empresa perteneciente a uno de estos sectores, aplicar alguno o algunos tipos de control automático, y ser empresa innovadora.

4.2. Control automático y productos de alta tecnología

Tras introducir los productos considerados de alta tecnología, en esta sección se estudian cuáles de estos productos incorporan control automático.

La determinación del conjunto de productos considerados como de alta tecnología sigue un proceso análogo al de la determinación de los sectores de tecnología alta. La tabla viene establecida por el INE basándose en los trabajos realizados por la OCDE y las adaptaciones realizadas por EUROSTAT (Tabla 4.2).

	LISTA DE PRODUCTOS DE ALTA TECNOLOGÍA							
Grupo	Descripción							
0 1 2 3 4 5 6 7	Armas y municiones Construcción aeronáutica y espacial Maquinaria de oficina y equipo informático Material electrónico, equipos y aparatos de radio, televisión y comunicaciones Productos farmacéuticos Equipo e instrumentos médico-quirúrgicos y de precisión óptica Maquinaria y material eléctrico (No incluida en listado de códigos CPA-2002)							
8 9	Productos químicos Maquinaria y equipo mecánico							

Tabla 4.2. Clasificación de los productos considerados de alta tecnología (Fuente: INE).

Como es lógico, existe una correlación entre productos de alta tecnología y sectores manufactureros de tecnología alta. Los grupos de productos 1, 2, 3, 4 y 5 de la Tabla 4.2 corresponden a productos producidos en sectores clasificados como de tecnología alta, y los grupos de productos 6, 7, 8 y 9 a sectores manufactureros clasificados como de tecnología media-alta (Tabla 4.1). El único grupo de productos que parece quedar descolocado es el grupo 0 (armas y municiones) que correspondería naturalmente al subsector manufacturero 296, estando incluido dicho subsector en el sector manufacturero 29 (Maquinaria y Equipos), también considerado de tecnología media-alta. Así pues, resulta que los sectores manufactureros que utilizan tecnología alta coinciden en gran parte con los sectores que producen productos de alta tecnología.

Si analizamos estos grupos de productos identificamos fácilmente aquellos que, dentro de la alta tecnología incorporada, incluyen control automático. En los grupos 0, 1, 6 y 9, el control automático se encuentra en aquellos productos que incorporan sensores, accionadores, tratamiento de señal y procesamiento de datos. En los grupos 2, 3 y 5 está presente en la mayoría de sus productos. Por el contrario, en los grupos 4 y 8, el control automático está ausente, mayoritariamente, de la tecnología incorporada en el producto.

En la Tabla 4.3 se encuentran los valores de producción de cada uno de estos grupos de productos (Tabla 4.2) en el año 2006 así como su crecimiento porcentual respecto al año anterior. Se puede observar, por ejemplo, que los grupos 4 y 8, agrupados, representan casi una tercera parte de la producción de alta tecnología de ese año.

		MEUR	△ 2005/06	% Prod. Ind.
0	Armas y municiones Construcción aeronáutica y espacial	717,2 479,7	25,0% 37,3%	0,17% 0,11%
2	Maquinaria de oficina y equipo informático Material electrónico: equipos y aparatos de radio,	508,4	-10,4%	0,12%
4	tv y comunicaciones Productos farmacéuticos	2.344,3 1.652.0	-0,6% 9.4%	0,56% 0.40%
5	Instrumentos científicos Maguinaria y material eléctrico	851,0 387,6	12,4% -3.2%	0,20% 0,09%
8	Productos químicos	1.229,9	7,7%	0,29%
9	Maquinaria y equipo mecánico Total productos de alta tecnología	704,6 8.874,7	1,9% 6,3 %	0,17% 2,13 %
	Total producción industrial	417.148,2	9,5%	

Tabla 4.3. Valor de la producción de bienes de alta tecnología por grupos de producto (millones de euros y porcentaje respecto al total de la producción industrial en 2006).

Fuente: Indicadores de Alta Tecnología 2006. INE (2008).

En el Capítulo 2 y especialmente en el 3 ya se han presentado aplicaciones de control automático en diversos sectores, entre otros en transporte (aeronáutico, aeroespacial, ferroviario, automoción, naval), y en robótica y mecatrónica (maquinaria y equipo mecánico, instrumentación médica).

Los dispositivos y equipos encargados de realizar la función del control automático son, tal vez, los elementos que mejor representan el control automático. Estos dispositivos pueden ser microcontroladores, autómatas programables, PCs industriales y controladores empotrados (*embedded*). En la industria, en las máquinas, en los instrumentos, en los vehículos y en numerosos dispositivos portátiles y domésticos, se incluyen microcontroladores, microprocesadores o dispositivos empotrados. En estos dispositivos el control automático se encuentra en los algoritmos que ejecutan las unidades de procesado. Ejemplos de estos algoritmos son:

- Leyes de control (en sistemas realimentados)
- Algoritmos de control (conjunto de instrucciones para la ejecución de la tarea de acuerdo con las especificaciones)
- Algoritmos de gestión de tareas de control (sistema operativo, tiempo real, etc.)
- Coordinación de tareas ejecutadas por diferentes controladores
 - Control distribuido
 - Comunicaciones
 - Sincronización

Entre los productos de alta tecnología, muchos de ellos incorporan controladores automáticos de uno u otro tipo. Esto es cierto entre productos de alta tecnología de los grupos 0, 1, 2, 3, 5, 6 y 9 (véase la Tabla 4.2).

4.3. Importancia del control automático para la empresa

La adopción del control automático, o la automatización en general, es una estrategia clave para la mejora de la competitividad de una empresa y también para alcanzar objetivos que de otro modo difícilmente podrían conseguirse (precisión, seguridad, homogeneidad, etc.). La mejora de la competitividad se consigue, por ejemplo, mediante:

- Reducción de costes:
 - reducción de mano de obra
 - reducción de las pérdidas de materiales
 - reducción del volumen de stock necesario
 - reducción de gastos administrativos
- Ahorro de tiempo:
 - reducción del tiempo de producción
 - reducción de los tiempos de preparación
 - reducción del tiempo de desarrollo
 - reducción del tiempo de respuesta a pedidos
 - reducción del tiempo de salida de nuevos productos

Las estrategias de automatización seguidas para conseguir estos objetivos pueden ser muy variadas; entre ellas se pueden encontrar:

- Especialización de las operaciones de planta. La utilización de equipos automáticos especializados ayuda a conseguir la máxima eficiencia (calidad, funcionamiento automático y ritmo de producción) en operaciones críticas reduciendo el tiempo de operación. Resulta especialmente interesante cuando se trata de manejar grandes volúmenes de producción.
- Combinación (encadenamiento) de operaciones en una misma estación de trabajo. Permite reducir el número de estaciones de trabajo, reducir el número de operarios, reducir los stocks intermedios y los tiempos de no operación, y simplifica el flujo de materiales. Por el contrario, las máquinas son más costosas y, a veces, aunque se requieran menos operarios, éstos deben ser más especializados. Por otra parte, cuando se produce una incidencia en la máquina la repercusión en la marcha de la cadena es más importante.
- Simultaneidad de operaciones. Es un paso más de la estrategia anterior: además de utilizar una sola estación para efectuar varias operaciones, algunas se llevan a cabo simultáneamente con el consiguiente ahorro de tiempo.
- Aumento de la flexibilidad. Permite disponer de máquinas aptas para trabajar con una gama más amplia de productos. Sin embargo, se trata normalmente de máquinas más caras, más sofisticadas y, a veces, no tan eficientes. Por otra parte pueden aumentar los tiempos de preparación.

- Automatización de los flujos de material y de su almacenamiento.
- Inspección en línea. Mejora la eficiencia al detectar, y tal vez corregir, errores en la misma estación en que se producen y, por lo tanto, evita añadir valor a piezas defectuosas. Por otra parte, su aplicación mejora la responsabilidad del operario hacia su trabajo.
- Control de proceso y optimización. Mejora la calidad del proceso, optimiza tiempo y material, y reduce la necesidad de mano de obra directa.
- Control de operaciones a nivel de planta. Reduce los tiempos muertos, ayuda a detectar los puntos negros, los cuellos de botella y minimiza el material en curso de fabricación.
- Fabricación integrada por computador (CIM). Aumenta el nivel de coordinación e integración y la extiende a otras áreas como pueden ser el diseño, el mantenimiento, el control de calidad, la gestión comercial, etc.

Un ejemplo de la importancia que tiene el control automático se encuentra en el documento publicado recientemente por la Comisión Europea de la Sociedad de la Información sobre Ahorro Energético (European Commission, 2009). En él se puede leer: «La eficiencia energética es un problema global que no se puede resolver simplemente mediante aproximaciones unilaterales. Se trata de un reto multidisciplinar que combina diferentes aspectos que pertenecen a la ciencia, la técnica, la tecnología de la información, la ecología y al sentido común». En este estudio, entre otros aspectos, se destaca el papel del control automático a la hora de proporcionar un control de máquinas que mejoran su eficiencia energética, permitir realizar una gestión en tiempo real de los recursos necesarios y optimizar la generación, distribución y consumo de energía. La aplicación del control automático también ayuda a reducir los rechazos de producción eliminando el consumo inútil de energía que dichos rechazos supondrían.

4.4. Situación actual del control en la industria española

Para valorar la situación actual del control automático se deben buscar indicadores que evalúen aspectos como: inversión en automatización, el gasto en I+D en automatización y control, fabricación de productos que incorporan control, etc.

El problema estriba en que las estadísticas oficiales no están planteadas para distinguir, por ejemplo, las inversiones en automatización de las inversiones globales en el sector industrial, o las patentes específicas en automatización y control, etc. Sin embargo, trabajar a partir de estadísticas oficiales tiene la ventaja de la objetividad, de la representatividad y de la globalidad: las muestras con que se trabaja son amplias y representativas,

los índices utilizados han sido muy estudiados y son fruto de la coordinación entre instituciones europeas y los principales países involucrados. Ello proporciona una mayor garantía y facilita la comparación.

Existen estudios privados sobre sectores específicos, pero en estos casos es más difícil garantizar la representatividad y fiabilidad de los datos, o bien se trata de estudios cuyo acceso tiene un coste económico elevado y con restricciones a su difusión pública. Por ello en este libro se ha descartado su utilización.

Por tanto, siguiendo el criterio propuesto al iniciar este capítulo, es decir, analizando los sectores y productos de alta tecnología y, especialmente, el sector TIC, se puede destacar que este último sector se ha señalado como el principal motor de crecimiento económico en los países desarrollados en los últimos años.

Analizando la Tabla 4.4 donde se presentan los resultados obtenidos por sectores, se puede concluir que, considerando el total del sector industrial español en el año 2007 y comparándolo con el total de los sectores industriales de alta y media tecnología, el valor medio de los ingresos de explotación y de los resultados del ejercicio en el conjunto de los sectores de alta y media tecnología supera al doble del obtenido en el conjunto del sector industrial global. Los mejores resultados se obtienen en las industrias química y farmacéutica, seguidas de automóvil, maquinaria y aparatos eléctricos, y de aparatos de radio, TV y comunicaciones. También se puede observar el indicador inversión realizada en activos materiales que también duplica a la media global, aunque existe una notable variación de uno a otro sector.

Probablemente la inversión en activos materiales no es el mejor indicador para recoger el esfuerzo de nuestras empresas en el desarrollo y la aplicación de nuevas tecnologías, donde interviene de forma destacada la incidencia del control automático.

Atendiendo a los indicadores de I+D mantenidos por el INE, los más importantes son los gastos internos en I+D y el número de personas e investigadores dedicados a I+D en los diferentes sectores industriales. Se entiende por gastos internos las inversiones, el coste del personal dedicado a I+D y otros gastos corrientes de funcionamiento. En la Tabla 4.5 se muestra el valor de estos indicadores para los sectores manufactureros y de servicios de tecnología alta y de tecnología media-alta. El total de gastos internos para este conjunto de sectores ha sido, en el año 2006, de 2.475 millones de euros, lo que representa un 37,8% de los gastos de todo el sector empresarial en este mismo capítulo. Por otra parte el número de empresas de estos sectores es de 22.953, es decir, un 14,71% respecto al total de empresas manufactureras.

En consecuencia, y a grandes rasgos, se puede constatar que los sectores manufactureros de alta y media tecnología invierten el doble que todo el conjunto manufacturero en

2007	Ingresos de explotación (miles de euros)	de ón ıros)	Inversión en activos materiales (miles de euros)	n en teriales euros)	Resultado del ejercicio (miles de euros)	ido :icio euros)	Número de empresas	ero ıresas
	Total	Valor medio	Total	Valor medio	Total	Valor medio	Total	% del total
Total industria	636.397.598	4.206	28.120.834	186	33.179.713	219	151.320	100,00%
Total sectores industriales de alta y media tecnología	195.738.495	8.793	5.547.330	249	9.902.486	445	22.261	14,7%
CNAE 244. Fabricación de productos farmacéuticos	14.147.609	44.489	516.773 1.625	1.625	918.834	2.889	318	0,2%
CNAE 300. Fabricación de máquinas de oficina y equipos informáticos	748.666	1.500	19.535	39	-846	-5	499	0,3%
CNAE 321. Fabricación de válvulas, tubos y otros componentes electrónicos	2.079.942	5.621	155.580	420	34.041	92	370	0,2%
CNAE 32-321. Aparatos de radio, TV y comunicaciones	4.784.082	17.334	110.007	399	123.605	448	276	0,2%
CNAE 33. Instrumentos médicos, de precisión, óptica y relojería	4.579.107	1.608	120.014	42	299.853	105	2.847	1,9%
CNAE 353. Construcción aeronáutica y espacial	3.621.285	28.072	160.100	1.241	22.878	177	129	0,1%
CNAE 24-244. Industria química excepto industria farmacéutica	36.883.669	12.494	1.392.686	472	4.619.333	1.565	2.952	2,0%
CNAE 29. Maquinaria y equipos	32.795.895	3.497	846.909	90	1.412.126	151	9.377	6,2%
CNAE 31. Maquinaria y aparatos eléctricos	23.064.385	10.357	432.459	194	1.098.172	493	2.227	1,5%
CNAE 34. Industria automóvil	64.155.103	36.266	1.612.131	911	1.111.649	628	1.769	1,2%
CNAE 35-353. Construcción naval, ferroviaria, de motocicletas y bicicletas, y de otro material de transporte	8.878.752	5.931	181.136	121	262.841	176	1.497	1,0%

Tabla 4.4. Resultados obtenidos en industria en general y en los sectores de alta y media tecnología, por principales variables económicas y sector de actividad durante

		Gastos int	Gastos internos: Personal en I+D	en I+D	
2006	N.° de empresas	Total	%	Total	Investi- gadores
Sectores manufactureros de tecnología alta y media-alta	22.953	2.475.997,00	37,80	27.413,00	12.778,90
Sectores manufactureros de tecnología alta	4.651	1.335.635,00	20,40	11.910,80	6.701,80
244. Industria farmacéutica	315	002.768,00	9,20	4.615,60	2.255,30
30. Maquinaria de oficina y material informático	543	61.965,00	06'0	299,00	425,30
321. Componentes electrónicos	349	32.393,00	0,50	482,80	229,00
32-321. Aparatos de radio, TV y comunicaciones	291	117.290,00	1,80	1.691,40	1.060,80
33. Instrumentos médicos, de precisión, de óptica y de relojería	3.036	101.627,00	1,50	1.705,00	951,10
353. Construcción aeronáutica y espacial	117	416.591,00	6,40	2.817,00	1.780,50
Sectores manufactureros de tecnología media-alta	18.302	1.140.362,00	17,40	15.502,20	6.077,10
24-244. Industria química, excepto industria farmacéutica	3.053	256.012,00	3,90	3.655,20	1.600,90
29. Maquinaria y equipos	9.549	303.314,00	4,60	4.650,90	1.883,80
31. Maquinaria y aparatos eléctricos	2.422	208.959,00	3,20	2.986,00	1.547,30
34. Industria automóvil	1.760	257.262,00	3,90	3.028,70	843,00
35-353. Construcción naval, ferroviaria, de motocicletas y bicicle-	1	1			6
tas y de otro material de transporte	1.518	114.817,00	1,80	1.181,30	202,20
Servicios de alta tecnología o de punta	39.362	1.961.266,00	29,90	24.685,40	14.108,00
64. Correos y telecomunicaciones	6.512	351.518,00	5,40	1.797,00	1.128,00
72. Actividades informáticas	31.400	446.667,00	6,80	8.863,90	4.081,80
73. Investigación y desarrollo	1.450	1.163.082,00	17,70	14.024,60	8.898,30
Total sectores de tecnología alta y media-alta		4.437.264,00	67,70	52.098,40	26.887,00
Total sector empresarial		6.557.529,00	100,00	82.869,80	39.935,70

 Tabla 4.5.
 Principales indicadores de I+D en los sectores de tecnología alta por rama de actividad y tipo de indicador. (Fuente: INE). Estadística sobre
 actividades de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico. Datos año 2006.

Notas: – Gastos internos: Total: Unidades: miles de euros – Personal en I+D: Total: En equivalencia a jornada completa (EJC) – Personal en I+D: Investigadores: En equivalencia a jornada completa (EJC)

compra de maquinaria y en gastos de I+D. Este 14,71% de empresas manufactureras agrupan al 37,8% de los gastos internos en I+D y al 33,08% de la plantilla de personal en I+D.

Los resultados de la encuesta sobre innovación tecnológica realizada a las empresas, correspondientes al periodo 2004 - 2006 apuntan a que el porcentaje de empresas innovadoras en los sectores manufactureros de tecnología alta es del 56,9% frente al 25,33% correspondiente al conjunto de todo el sector empresarial. En los sectores de tecnología media-alta es del 42,28%, y en servicios de alta tecnología del 43,94%; también la proporción supera ampliamente al valor de la media global (Tabla 4.6).

Analizando con detalle los sectores, los resultados provisionales correspondientes al 2007 señalan que los de manufactura con un porcentaje mayor de empresas innovadoras son: petroquímicas y nucleares, química, farmacia, aeroespacial, aparatos de radio-TV-

2004 - 2006	Empre innova		Empresa	as EIN
	Total	%	Total	%
Sectores manufactureros de tecnología alta y media-				
alta	4.040	44,65	4.547	50,25
Sectores manufactureros de tecnología alta	834	56,9	928	63,29
244. Industria farmacéutica	197	66,07	226	75,69
30. Maquinaria de oficina y material informático	37	58,2	40	62,96
321. Componentes electrónicos	101	47,13	113	52,97
32-321. Aparatos de radio, TV y comunicaciones	113	74,31	123	80,57
33. Instrumentos médicos, de precisión, de óptica y de				
relojería	346	52,26	383	57,85
353. Construcción aeronáutica y espacial	41	52,84	44	56,81
Sectores manufactureros de tecnología media-alta	3.206	42,28	3.619	47,73
24-244. Industria química excepto industria farmacéu-				
tica	818	58,36	929	66,34
29. Maquinaria y equipos	1.417	40,54	1.594	45,59
31. Maquinaria y aparatos eléctricos	436	39,27	495	44,53
34. Industria automóvil	366	37,16	411	41,63
35-353. Construcción naval, ferroviaria, de motocicle-				
tas y bicicletas y de otro material de transporte	169	28,64	191	32,38
Servicios de alta tecnología o de punta	1.585	43,94	1.876	52,01
64. Correos y telecomunicaciones	232	22,75	255	24,99
72. Actividades informáticas	1.119	49,12	1.311	57,55
73. Investigación y desarrollo	234	75,5	310	100
Total sectores de tecnología alta y media-alta	5.626,00	44,45	6.423,00	50,75
Total sector empresarial	49.415,00	25,33	53.695,00	27,53

Notas; 1. EIN: Empresas innovadoras en el período 2004-2006 o con innovaciones en curso o no exitosas.

Tabla 4.6. Empresas innovadoras y empresas EIN en los sectores de tecnología alta por sectores y tipo de indicador durante el periodo 2004-2006. (Fuente: INE).

comunicación, e instrumentos, óptica y relojería. Los sectores de servicios que más destacan en innovación son el de I+D y el de programas de ordenador. En todos estos sectores el porcentaje de empresas innovadoras supera al 50% del sector.

Así pues, aunque no es posible disponer de datos relativos a la aplicación del control automático en sectores y productos, sí se ha podido constatar que existe una relación importante entre sectores de tecnología alta y productos de alta tecnología con las aplicaciones del control automático, y también entre innovación tecnológica y aplicación avanzada de las tecnologías asociadas con el control. Los resultados de las estadísticas presentadas muestran la importancia de la innovación, de la I+D, y de los sectores de tecnología alta así como de la mayor rentabilidad que presentan dichos sectores respecto al conjunto global. Sin ninguna duda, las tecnologías del control automático inciden decisivamente en estos resultados.

4.5. Análisis de la situación

Basándose en resultados procedentes de trabajos similares que tratan de la investigación, el desarrollo y la innovación, aunque no centrados en un área tecnológica específica como es el control automático, se va a comparar la situación en España con la de otros países, especialmente de la Unión Europea.

En todos ellos es un lugar común considerar la innovación y la I+D como actividades imprescindibles para garantizar la competitividad de las empresas en general y de la industria en particular, en un entorno de competencia internacional. Así en Sáez *et al.*, 2008, se defiende que la creación de valor y la capacidad de sobrevivir se basa cada vez menos en las ventajas en costes, y más en la diferenciación de los productos y, en particular, en la calidad que éstos incorporen. Por ello la competencia en precios da paso a una competencia basada en la capacidad de crear nuevos productos y/o procesos y en la mejora de los mismos.

Al hablar de I+D se consideran tres tipos de actividades:

- Investigación básica: trabajos originales, experimentales o teóricos, que se llevan a cabo con la finalidad principal de obtener nuevos conocimientos sin que estén dirigidos a una aplicación concreta.
- Investigación aplicada: trabajos originales orientados a adquirir nuevos conocimientos con una orientación práctica concreta.
- Desarrollo tecnológico: trabajos basados en conocimientos existentes dirigidos a la fabricación de nuevos materiales, productos o dispositivos; a establecer nuevos procesos, sistemas y servicios, o a conseguir una mejora sustancial de los existentes.

Por ello en I+D los agentes que intervienen incluyen a los centros de investigación del sector público, las instituciones de enseñanza superior, las empresas y las instituciones privadas sin fines lucrativos (IPSFL). La Tabla 4.7 y la Figura 4.2 muestran la distribución de gastos en I+D en España en 2007.

2007	Total	Investigación básica	Investigación aplicada	Desarrollo tecnológico
Total Administración pública Enseñanza superior Empresas IPSFL	10.846.132,00	2.186.658,00	4.727.182,00	3.932.292,00
	1.912.017,00	585.785,00	1.095.655,00	230.576,00
	2.940.053,00	1.366.239,00	1.149.315,00	424.499,00
	5.973.999,00	227.098,00	2.471.109,00	3.275.793,00
	20.062,00	7.536,00	11.102,00	1.424,00

Tabla 4.7. Gastos de diversos agentes en I+D en el año 2007 en España. (Fuente: INE).

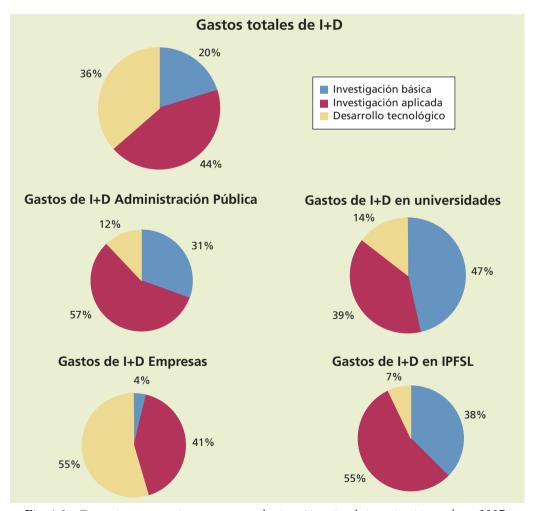


Fig. 4.2. Gastos internos corrientes por sector de ejecución y tipo de investigación en el año 2007. (Fuente: INE).

Lógicamente, en las empresas los porcentajes más altos del gasto de I+D que son del 96% corresponden a investigación aplicada y desarrollo, mientras que en las universidades estos mismos gastos son del 53%. Cabe destacar que, en el caso de empresas internacionales ubicadas en España, sólo se han contabilizado en estas estadísticas los gastos de I+D realizados en España.

Para comparar estos gastos con los de otros países se ha trabajado con los porcentajes referidos al PIB de cada país. De este modo se comparan los esfuerzos que realiza cada país en I+D. En la Tabla 4.8 se muestra el esfuerzo global en I+D (gasto global referido al PIB de cada país) para los países de la Unión Europea en el año 2001 y el 2007.

España, con un índice de 1,27 en el año 2007, queda lejos del índice correspondiente a la media del conjunto de los 27 países que constituyen actualmente la Unión Europea (UE27), que es de 1,83, y aún más del índice correspondiente a los 15 países que consti-

		2	.001		2007			
	Todos	Empresas	Administra- ción Pública	Enseñanza universitaria	Todos	Empresas	Administra- ción Pública	Enseñanza universitaria
UE 27	1,86	1,21	0,25	0,40	1,83	1,17	0,24	0,41
UE 15	1,92	1,25	0,25	0,41	1,91	1,23	0,25	0,42
Euro Zona 15	1,86	1,19	0,27	0,39	1,86	1,19	0,26	0,39
Bélgica	2,08	1,51	0,13	0,41	1,87	1,30	0,16	0,41
Bulgaria	0,47	0,10	0,31	0,06	0,48	0,15	0,28	0,05
República Checa	1,20	0,72	0,29	0,19	1,54	0,98	0,29	0,26
Dinamarca	2,39	1,64	0,28	0,45	2,55	1,66	0,18	0,70
Alemania	2,46	1,72	0,34	0,40	2,53	1,77	0,35	0,41
Estonia	0,71	0,24	0,10	0,36	1,14	0,54	0,10	0,48
Irlanda	1,10	0,77	0,09	0,24	1,31	0,88	0,09	0,35
Grecia España	0,58	0,19 0,48	0,13 0,15	0,26	0,57 1,27	0,15	0,12 0,22	0,29
Francia	0,91 2,20	1,39	0,15	0,28 0,42	2,08	0,71 1,31	0,22	0,33 0,40
Italia	1,09	0,53	0,36	0,42	2,00	0,56	0,34	0,40 –
Chipre	0,25	0,05	0,20	0,33	0,45	0,30	0,21	0,19
Letonia	0,23	0,05	0,09	0,17	0,43	0,10	0,12	0,13
Lituania	0,67	0,20	0,27	0,21	0,82	0,23	0,13	0,41
Luxemburgo	-	_	0,14	0,01	1,63	1,36	0,22	0,05
Hungría	0,92	0,37	0,24	0,24	0,97	0,49	0,23	0,23
Malta	_	_	_	_	0,60	0,39	0,02	0,19
Países Bajos	1,80	1,05	0,25	0,49	1,70	1,03	0,22	0,45
Austria	2,07	_	_	_	2,56	1,81	0,13	0,62
Polonia	0,62	0,22	0,19	0,20	_	_	_	-
Portugal	0,80	0,26	0,17	0,29	1,18	0,61	0,11	0,35
Rumanía	0,39	0,24	0,11	0,04	0,53	0,22	0,18	0,13
Eslovenia	1,50	0,87	0,37	0,24	1,53	0,94	0,36	0,24

Continúa →

Tabla 4.8. Gastos internos corrientes por países y tipo de investigación en el año 2007. (Fuente: EUROSTAT).

		2	.001			20	07	
	Todos	Empresas	Administra- ción Pública	Enseñanza universitaria	Todos	Empresas	Administra- ción Pública	Enseñanza universitaria
Eslovaguia	0,63	0,43	0,15	0,06	0,46	0,18	0,16	0,11
Finlandia	3,30	2,35	0,34	0,60	3,47	2,51	0,29	0,65
Suecia	4,17	3,23	0,12	0,82	3,64	2,65	0,22	0,77
Reino Unido	1,79	1,17	0,18	0,41	-	_	-	_
Croacia	-	-	-	-	0,86	0,35	0,22	0,29
Turquía	0,54	0,18	0,04	0,32	_	-	-	_
Islandia	2,95	1,74	0,59	0,55	-	_	-	_
Noruega	1,59	0,95	0,23	0,41	1,65	0,88	0,25	0,51
Suiza	-	-	-	-	-	_	-	_

^{1.} El Gasto interior en I+D está formado por el conjunto de gastos realizados en I+D por cada uno de los sectores en que se ha dividido la economía, cualquiera que sea el origen de los fondos. Se muestra como porcentaje del PIB (Intensidad de I+D).

Nota: Los datos están sujetos a actualización continua. La información más actual está disponible en la web de Eurostat. Los datos españoles proporcionados por Eurostat no siempre corresponden a la última actualización y la información más reciente es la publicada n el apartado de resultados detallados correspondiente.

Tabla 4.8. Continuación

tuían la Unión Europea antes de su ampliación a 27 miembros, que es de 1,91, quedando situada por detrás de los países europeos de referencia habituales (Alemania, Francia, Países Bajos, etc.), incluso por detrás de la República Checa y Eslovenia, y sólo por delante de otros países del Este y Sur de Europa (Portugal, Grecia, Estonia, Polonia, etc.).

A pesar de esta situación, vemos que el índice correspondiente al conjunto de los 27 países se ha reducido ligeramente pasando de 1,86 en 2001 a 1,83 en 2007. Lo mismo ocurre con el conjunto de los 15: se ha pasado de 1,92 a 1,91. Sin embargo en España, en ese mismo periodo, se ha crecido del 0,91 al 1,27, es decir, se ha incrementado este índice en casi un 40%.

Otro de los aspectos característicos de la situación en España es el peso de las empresas multinacionales participadas mayoritariamente por capital exterior, especialmente en los sectores de fabricación de vehículos (automóviles, ferrocarril, motocicletas). Así, en fabricación de automóviles, por ejemplo, España se ha consolidado como el cuarto fabricante europeo y el noveno del mundo, pero el núcleo de la actividad de I+D+i se realiza esencialmente en otros países, con lo que se produce una clara disociación entre el peso de España en estos sectores en términos de actividad productiva y de I+D.

^{2.} I+D comprende el trabajo creativo llevado a cabo de forma sistemática para incrementar el volumen de conocimientos, incluido el conocimiento del hombre, la cultura y la sociedad, y el uso de ese saber para crear nuevas aplicaciones (OCDE, ed. 2002).

Es interesante aportar algunos de los resultados del trabajo realizado por la Dirección General de Política de la Pequeña y Mediana Empresa (Sáez *et al.*, 2008). Según este estudio, en el sector de productos farmacéuticos se evidencia la considerable importancia de la I+D (interna y externa), tanto en las PYMEs como en las grandes empresas. No obstante, son estas últimas las que realizan la mayor parte de los gastos totales en I+D+i, con el 85,7% del total. Por otra parte, en los sectores de alimentación, bebidas y tabaco, y de metalurgia y manufacturas metálicas, algunas pautas se invierten respecto a las actividades precedentes. Por un lado, en ambos sectores, la adquisición de maquinaria pasa a ser la primera partida de la I+D+i, con una participación del 48,6% y 39,2% respectivamente, lo que revela la gran importancia de la innovación inducida por los proveedores en las actividades consideradas de tecnología baja. Además, ahora, la tercera posición, por detrás de la I+D interna, corresponde a la introducción de las innovaciones en el mercado, con una participación del 9,9% y 11,6%, respectivamente. Por otra parte, también se revierte la importancia del grupo de empresas que lidera los gastos en I+D+i, que ahora corresponde a las PYMEs.

Otro de los resultados que aporta este mismo trabajo se refiere a la diferencia de estrategia entre las grandes empresas y las PYMEs. Mientras la estrategia competitiva basada en la I+D está impulsada sobre todo por las grandes empresas de los sectores de tecnología alta y media-alta, en las ramas de actividad de tecnología media-baja y baja el peso de los gastos recae principalmente en las PYMEs, que basan su estrategia en la innovación, en general menos costosa, y al estar más cercana al mercado, susceptible de ofrecer resultados más inmediatos.

Este análisis es tenido en cuenta en el capítulo 7 para, junto con las tendencias y posibilidades que ofrecen los mercados y nuevos productos relacionados más directamente con el control automático, establecer recomendaciones para el crecimiento y mejora de la competitividad de los sectores manufactureros y de servicios de tecnología alta en España.

5

Análisis de la formación en control automático

La enseñanza del control automático, o de la automática en general, es un aspecto clave en la formación de los estudiantes de ingenierías y ciencias. No hay que olvidar que estos alumnos van a desempeñar un papel relevante dentro del ámbito de la I+D+i. Muchos de ellos, por su formación técnica, estarán involucrados en investigaciones de alto nivel así como en procesos de desarrollos industriales y/o con repercusiones empresariales. Por todo ello, la inversión en la formación de una materia multidisciplinar como es la automática produce una rentabilidad a corto, medio y largo plazo en la sociedad que fácilmente se puede constatar por la experiencia obtenida hasta ahora. El control automático se ha desarrollado en los últimos 25 años como una disciplina de carácter fundamental que ha permitido que las nuevas generaciones de ingenieros y alumnos de algunas carreras experimentales hayan sido capaces de resolver problemas de gran importancia práctica y con un enorme impacto en la economía nacional.

Por otro lado, y cara al futuro, la formación en la automática se enfrenta a importantes desafíos. Los nuevos planteamientos de la enseñanza del control automático deben abarcar aspectos amplios, que reflejen problemas y aplicaciones reales. Sin olvidar la visión sistemática y la educación básica en los conceptos fundamentales del control, es necesario integrar una serie de conocimientos y desarrollos tecnológicos que han pasado a formar parte de esta área. Así, la incorporación de las tecnologías de la información ha ocasionado un desplazamiento hacia sistemas basados en estas tecnologías en los que la complejidad inherente a los mismos es un aspecto crítico. La multidisciplinariedad de esta materia es ahora un aspecto clave para formar a las nuevas generaciones de ingenieros y científicos que tendrán que abordar problemas de campos tan diversos como la biología, la medicina, química, finanzas, etc. Es pues imprescindible no perder esta visión interdisciplinar de los estudios, si de verdad se pretende impartir una formación capaz de afrontar los retos que presenta la sociedad. Se trata de proporcionar herramientas y conocimientos no sólo para aplicarlos de forma inmediata a la resolución de problemas de control sino para realizar avances sustanciales en nuevas aplicaciones, incluso de ámbitos alejados de la propia automatización. La complejidad actual de los procesos de regulación la alejan del control directo de los mismos para exigir con carácter predominante una formación más completa y no tan específica.

La introducción de las nuevas tecnologías en los equipos y sistemas automáticos, basados cada vez más en equipos programables de altas prestaciones, permiten flexibilizar y mejorar los procesos de medida, control, regulación y comunicación, utilizados en las máquinas y procesos industriales. De ahí que la formación en el control automático se desarrolle desde la integración de las nuevas tecnologías, los sistemas automáticos y lo que es propiamente la automatización y regulación. Por eso se requieren competencias más transversales en la dimensión tecnológica, donde se combinen elementos y sistemas de diversos ámbitos (mecánicos, electrónicos, informáticos, etc.). La enseñanza desde los niveles más elementales en tecnologías demanda una visión sistemática y pluridisciplinar en constante evolución. La seguridad, fiabilidad y calidad exigida a los sistemas automáticos adquiere cotas que sólo mediante un nivel de alta cualificación y profesionalidad se pueden afrontar.

El trabajo en entornos informatizados, tanto en la fase de proyecto con la utilización de herramientas informáticas de diseño asistido por computador, como para la elaboración de los programas de control de los sistema y procesos, demandan además un dominio de las destrezas propias de los sistemas informáticos y de programación de los mismos.

La educación y aprendizaje de temas relacionados con sistemas de control automático tienen lugar en distintas materias al mismo tiempo que se encuentran imbricadas en un amplio espectro de aplicaciones y tecnologías de nuestra sociedad. En un sentido amplio, la ingeniería del control automático implica tareas de modelado, simulación, identificación, optimización, robustez y evaluación de prestaciones. Por otra parte el uso y aprovechamiento del control implica la integración de otras disciplinas como la electrónica, las comunicaciones, los computadores, la teoría y procesamiento de señales, los sistemas de tiempo real, los sensores y los accionadores. Desde el punto de vista de capacitación profesional el control aparece en aplicaciones industriales, eléctricas y mecánicas, de manufactura, de transporte, aeronáutica, relacionadas con biología, economía o medicina.

5.1. En el contexto español

En España, en las diversas etapas formativas de los estudiantes la presencia del control automático como enseñanza con contenidos propios es relativamente escasa. Sin embargo, su impacto en muy variadas titulaciones es bastante amplio.

Las nuevas tendencias en educación superior definen al ingeniero de control como aquel capaz de integrar los diferentes elementos de un sistema (mecánico, eléctrico, informático, etc.) para aportar soluciones integradas de automatización y control de procesos. Esto requiere no sólo una sólida formación en ciencias básicas (matemáticas y físi-

cas) sino además conocimientos de control (con una clara proyección profesional y aplicada) y habilidad para manejarse con una amplia variedad de disciplinas.

El control automático, como materia con carácter horizontal y aplicaciones en muy variados sectores, se puede presentar de muy diversas maneras. El análisis de la formación del control automático en España que se presenta en este capítulo se ha realizado atendiendo a niveles de enseñanza: secundaria, universitaria, y formación continua. Cabe destacar el papel que está adquiriendo la enseñanza electrónica (*e-learning*) que facilita la educación a distancia. También se recogen algunas fuentes de material formativo desde donde se divulga esta materia, así como actividades que fomentan la difusión del conocimiento del control para su posterior utilización y aplicación.

Respecto al control automático, en la actualidad se ofrecen cursos relacionados con la regulación y la automática en grados, cursos de postgrado, másteres (académicos y profesionales), y cursos de doctorado (en proceso de extinción). En muchos casos los contenidos del control automático no se reflejan explícitamente en el título de las asignaturas, pero están presentes y asociados a asignaturas muy diversas. Se describen a continuación los estudios de esta materia que corresponden a enseñanzas oficiales.

5.1.1. Enseñanzas oficiales preuniversitarias y formación profesional

En la enseñanza secundaria en España, si bien no hay una clara presencia específica del control automático en la parte que se considera obligatoria (la ESO: Enseñanza Secundaria Obligatoria, de 12 a 16 años), sí aparece en el tramo que corresponde a los estudios entre 16 y 18 años (Bachillerato y Formación Profesional).

En los estudios de Educación Secundaria, el área de Tecnología trata de fomentar el aprendizaje de conocimientos y el desarrollo de destrezas que permitan tanto la comprensión de los objetos técnicos, como la intervención sobre ellos. Para ello desarrolla dos asignaturas tituladas Tecnología: una en tercero (obligatoria) y otra en cuarto (optativa) de 70 horas por curso académico esta última. Atendiendo a los contenidos mínimos regulados por los decretos correspondientes (R.D. 1631/2006 de 29 de diciembre), -si bien cada Comunidad Autónoma tiene plenas competencias en materia educativa para establecer distribuciones de contenido diferentes o ampliarlos-, el control aparece en uno de los 6 bloques de la asignatura de cuarto. Es decir, en la Educación Secundaria se desarrolla una primera aproximación al tema del control automático y la simulación mediante ordenador bajo el prisma de su aplicación en el campo de la robótica (Tabla 5.1).

Mayor presencia tiene la automática y el control en la enseñanza de Bachillerato, dentro de la Modalidad de Bachillerato Tecnológico (R.D. 1178/1992 de 2 de octubre

por el que se establecen las enseñanzas mínimas de estos estudios). En esta vía, el alumno puede elegir sendas optativas tituladas Tecnología Industrial I y II en 1º y 2º, respectivamente, que cuentan con los siguientes módulos donde se habla propiamente de control (Tabla 5.1).

Curso	Asignatura	Módulo y Contenidos
4° ESO	Tecnología	Bloque 4. Control y robótica Experimentación con sistemas automáticos, sensores, accionadores y aplicación de la realimentación en dispositivos de control (diferenciando sistemas de control en lazo abierto y cerrado) Diseño y construcción de robots. Uso del ordenador como elemento de programación y control. Trabajo con simuladores informáticos para verificar y comprobar el funcionamiento de los sistemas diseñados
1° Bachillerato	Tecnología Industrial I	Módulo 3. Elementos de máquinas y sistemas Elementos de un circuito genérico. Generador, conductor. Dispositivos de regulación y control. Receptores de consumo y utilización.
2° Bachillerato	Tecnología Industrial II	Módulo 3. Sistemas automáticos Elementos que componen un sistema de control: transductores, captadores y actuadores. Estructura de un sistema automático. Sistemas de lazo abierto. Sistemas realimentados de control. Comparadores. Módulo 4. Circuitos neumáticos y oleohidráulicos Elementos de accionamiento, regulación y control. Módulo 5. Control y programación de sistemas automáticos Aplicación al control de un dispositivo. Control programado.

Tabla 5.1. Presencia del control automático en la Enseñanza Secundaria y Bachillerato.

En general, y dadas las restricciones de tiempo que acompañan al desarrollo de estos programas y a la orientación de los módulos (en algunos centros de Bachillerato no se imparte la vía tecnológica, por lo que los estudiantes no pueden cursar esta materia), la mayoría del alumnado de enseñanza obligatoria o secundaria no adquiere una formación específica en control y automatización. Sin embargo, el futuro profesional de muchos de estos jóvenes va a estar ligado a la industria de los procesos y de fabricación, y aunque tengan otras alternativas a nivel de estudios superiores (tanto de formación profesional como universitaria), se resienten de la falta de una base específica en conceptos fundamentales del control automático y de la ingeniería de procesos. Sin embargo, en muchos casos se han visto motivados al acercarse al ámbito de control a través de estas asignaturas para luego enfocar su futuro profesional en esta línea.

Dentro de la formación profesional, organizada en ciclos formativos de dos niveles, de grado medio y superior, existe un ciclo formativo de grado superior que otorga el título de **Técnico Superior en Sistemas de Regulación y Control Automático**. En el R.D.

619/95 se establece este título y las enseñanzas mínimas (BOE 188/1995 de 8 de agosto). La duración del ciclo formativo es de 2000 horas (5 trimestres), de las cuales hasta un 25% se realizan en una empresa. El R.D. 191/1996 de 9 de febrero (BOE núm. 57) establece el currículo de dicho ciclo formativo. Los objetivos generales del ciclo formativo se podrían resumir en el desarrollo (desde la fase inicial de análisis hasta la implementación) de proyectos de control y regulación de máquinas, procesos y sistemas.

El título está enmarcado dentro del epígrafe Electricidad y Electrónica, y su plan de formación (teórico-práctica) se desglosa en módulos profesionales (se omiten los módulos transversales) con las consiguientes competencias profesionales (Tabla 5.2).

Módulos	Competencias
Sistemas de control secuencial.	Desarrollar y mantener sistemas automáticos para procesos secuenciales.
Sistemas de medida y regulación.	Desarrollar y mantener sistemas automáticos de medida y regulación para procesos continuos.
Informática industrial. Comunicaciones industriales.	Desarrollar y mantener sistemas informáticos y de comunicación industrial.
Sistemas electrotécnicos de potencia.	Desarrollar y mantener sistemas electrotécnicos de potencia.
Gestión del desarrollo de sistemas automáticos.	Organizar, gestionar y controlar la construcción y mantenimiento de los sistemas automáticos.
Administración, gestión y comercialización en la pequeña empresa.	Realizar la administración, gestión y comercialización en una pequeña empresa o taller.

Tabla 5.2. Módulos y competencias del grado de formación profesional en Sistemas de Regulación y Control Automático.

De ellos, el módulo 2, «Sistemas de medida y regulación» (90 horas) es el que hace referencia de forma directa a la regulación, manual y automática; a la realimentación y los sistemas realimentados; a sistemas de adquisición y tratamiento de datos, convertidores A/D y D/A; a técnicas avanzadas de control (control borroso, control distribuido, etc.).

Este grado permite el acceso a todas las ingenierías técnicas, a algunas diplomaturas relacionadas con las materias tratadas y a las licenciaturas de Ciencias Físicas, Matemáticas, e Ingeniería de Telecomunicaciones.

El tema del control automático también queda recogido en otros títulos de Formación Profesional de Grado Superior, por ejemplo en Supervisión y Control de Maquina-

ria Marina e Instalaciones de Buque, con un módulo de Sistemas automáticos y de regulación del buque; y en el de Desarrollo de Proyectos Mecánicos, con un módulo de Automatización de la fabricación. Y de forma más tangencial figura en otros títulos de Grado Superior como: Desarrollo de Proyectos de Instalaciones de Fluidos, Térmicos y Manutención, Mantenimiento y Montaje de Instalaciones de Edificio y Proceso, o en Mantenimiento de Vehículos Autopropulsados.

5.1.2. Enseñanzas oficiales universitarias de grado

Tras la declaración de Bolonia de 1999 la educación universitaria ha quedado estructurada en dos niveles diferenciados, el grado y el posgrado, que se desarrollan en tres ciclos. El grado comprende las enseñanzas universitarias de primer ciclo, y tiene como objetivo lograr la capacitación de los estudiantes para integrarse directamente en el ámbito laboral europeo con una cualificación profesional apropiada. El segundo nivel comprende las enseñanzas de posgrado; integra el segundo ciclo de estudios dedicado a la formación avanzada y conducente a la obtención del título del máster. El tercer ciclo, conducente a la obtención del título de doctor, representa el nivel más elevado en la educación superior. Esta estructura está regulada por el Real Decreto 1393/2007, de 29 de octubre, por el que se establece la ordenación de las enseñanzas universitarias oficiales. En este marco regulador, los planes de estudio de las distintas disciplinas son propuestos por cada universidad sin la exigencia de una troncalidad común en el territorio nacional, con la excepción de los títulos que habilitan para el ejercicio de actividades profesionales reguladas en España, en cuyo caso el plan de estudio debe adecuarse al desarrollo de las competencias necesarias para el ejercicio de la profesión.

En los planes de estudio vigentes hasta ahora, antes de la incorporación de las directrices de Bolonia, la materia del control automático aparecía diseminada en diversas titulaciones, fundamentalmente ingenierías. Así, en Ingeniería Industrial (especialidad Automática y Electrónica), en Ingeniería Electrónica, en Ingeniero en Automática y Electrónica Industrial, en Ingeniería Técnica Industrial especialidad en Electrónica Industrial, y en algunas asignaturas de Ingeniería Informática, Ingeniería de Telecomunicaciones, Ingeniero de Minas, Ingeniero Químico, Ingeniería Técnica de Sistemas, Ingeniero Naval, Ingeniería Aeronáutica, etc. En la mayoría de estas titulaciones las asignaturas que hacen relación a la automática tienen un carácter obligatorio u optativo, pero no troncal, y se imparten en los últimos cursos.

Con la adaptación de estudios, muchas de estas titulaciones dejan de existir para dar lugar a grados en los que en algunos casos se imparten materias con una fuerte relación con temas de automatización y control, que aparecen a veces con denominaciones muy variadas.

Como resultado de todo esto, la situación de la educación universitaria en España actualmente es muy compleja. Por un lado, coexisten nuevas propuestas de títulos de grado junto con licenciaturas e ingenierías del plan anterior. Además, todavía están pendientes de verificación muchos títulos de grado, se esperan nuevas propuestas, y se prevé que su implantación será un proceso largo abierto a modificaciones.

A continuación, a falta de un título de grado con contenidos específicos de control automático, se presentan aquellos grados en los que se imparte o está prevista la docencia en temas de control.

Como establece el RD 1393/2007 los Grados tienen 240 créditos. Dentro de los títulos universitarios oficiales que habilitan para el ejercicio de la profesión de Ingeniero Técnico Industrial (BOE de 20 de febrero de 2009, Orden Ministerial CIN/351/2009 de 9 de febrero) se encuentran los grados en Ingeniería Mecánica, Eléctrica, Química Industrial, Textil, y Electrónica Industrial y Automática. En ellas, 60 créditos ECTS ³ corresponden a formación básica; otro bloque de 60 créditos es común a la rama industrial, donde cabe considerar una asignatura de Automatización y Control Industrial para desarrollar la competencia descrita como «Conocimiento sobre los fundamentos de automatismos y métodos de control». El título se completa con un mínimo de 48 créditos de la tecnología específica y 12 créditos de Proyecto Fin de Grado. Dentro de estos créditos de tecnología específica, y para el grado en Electrónica Industrial y Automática, se contemplan las competencias de:

- Conocimiento y capacidad para el modelado y simulación de sistemas.
- Conocimientos de regulación automática y técnicas de control y su aplicación a la automatización industrial.
- Conocimiento de principios y aplicaciones de los sistemas robotizados.
- Conocimiento aplicado de informática industrial y comunicaciones.
- Capacidad para diseñar sistemas de control y automatización industrial.

El grado de Electrónica Industrial y Automática está ya implantado en el curso 2008/09 en algunas universidades, entre otras, la Universidad Carlos III de Madrid, la Universidad Autónoma de Barcelona y la Universidad de Extremadura. En el Anexo B se muestra como ejemplo (Tabla B.1) algunas de las asignaturas con las que se desarrolla este grado en la Universidad Carlos III de Madrid.

En algunos grados como Ingeniero Aeronáutico o Ingeniero Técnico en Aeronáutica, Ingeniero Industrial o Ingeniero en Informática, también aparece dentro de las competencias que deben adquirirse la de control automático o temas relacionados.

³ Crédito ECTS: es la unidad de medida de la actividad académica del estudiante, en la que se integra tanto la enseñanza práctica como la teórica, las actividades dirigidas y el volumen de trabajo efectivo que el estudiante tiene que realizar para superar cada materia de un plan de estudio.

Esto significa que, en general, la formación de los graduados españoles en temas relacionados con el control es baja, y que hay pocas asignaturas sobre esta materia. Si bien es cierto que en algunos centros puede haber más presencia de estas materias en algunas titulaciones, específicamente en Electrónica Industrial (hasta 30 ECTS), en los otros grados comentados (en Química, Eléctrica, etc.) su dedicación gira en torno a los 6 ECTS.

Por otro lado, la mayoría de las asignaturas de estudios de grado relacionadas con el control automático presentan una fuerte componente práctica que se puede desarrollar de muy diversas formas, según los centros, la titulación, o asignatura de la que se trate. En algunas de ellas las prácticas se llevan a cabo mediante herramientas de simulación que permiten diseñar y aplicar las estrategias de control automático. Estas herramientas pueden ser comerciales (algunas de ellas están muy difundidas en el mundo universitario y son de 'facto' un estándar), o desarrolladas por un equipo docente para una materia con un propósito metodológico específico. También se dispone de plantas, sistemas y montajes educativos, algunos de los cuales reproducen sistemas complejos con grandes posibilidades educativas.

5.1.3. Enseñanzas oficiales de posgrado

Para iniciar los cursos de máster y posgrado es necesario estar en posesión del título de grado u otro expresamente declarado equivalente (R.D. 1393/2007 de 29 de octubre). Algunas universidades ofrecen programas combinados de máster y posgrado, en los que un programa de posgrado puede contener, entre otras muchas opciones, un solo máster, un conjunto de materias o módulos conducentes a la obtención de varios títulos de máster, o estudios de máster y doctorado. En función de los módulos de formación elegidos el estudiante obtendrá un diploma de máster o de posgrado.

Todavía perviven algunos programas de doctorado en proceso de extinción del área de Ingeniería de Sistemas y Automática, y es de esperar que algunos de ellos den lugar a estudios de máster, dada la demanda de esta formación que ha habido en los últimos años. La mayoría de estos Programas de Doctorado han obtenido la Mención de Calidad al ser evaluados por el Ministerio de Educación, Política Social y Deporte, lo que constituye un reconocimiento de la solvencia científico-técnica y formadora de esos estudios, así como de los grupos y departamentos que desarrollan esa formación.

Dentro de los másteres, atendiendo a los nuevos planes de estudio se encuentran los siguientes, en los que aparece reflejada la materia del control automático.

Másteres que habilitan para el ejercicio de una profesión

Máster que habilita para la profesión de Ingeniero Industrial (Orden CIN/311/2009 de 9 de febrero). Además de los requisitos de acceso que debe cumplir, el alumno tiene que realizar un mínimo de 30 créditos ECTS adicionales del módulo de Tecnologías Industriales en los que las competencias relacionadas con la automática son las siguientes:

- Capacidad para diseñar y proyectar sistemas de producción automatizados y control avanzado de procesos
- Conocimiento y capacidad para proyectar y diseñar instalaciones de domótica y edificios inteligentes.

Másteres de especialización

Las universidades pueden proponer titulaciones de posgrado con una mayor especialización y orientada a sectores específicos, denominadas másteres de especialización. Existen una gran variedad de propuestas, desarrollando entre 60 y 120 créditos ECTS, con tópicos de control automático, robótica, automatización, informática industrial, modelado y simulación, sistemas inteligentes, procesamiento de señales, optimización, visión artificial, etc. enfocados según el tejido empresarial en el que se enmarca la universidad que lo propone. Estos programas proporcionan una especialización académica profesional, además de estar orientados a promover la investigación, y tienen características propias diferenciales (hay másteres profesionales, de especialización, metodológicos, orientados a la formación continua, etc.). Una vez superados los créditos del programa de estudios se obtiene el título del máster que permite el acceso al doctorado.

Algunos de los másteres oficiales que ya están implantados en España durante el curso 2008/09 en universidades públicas —y que podrían cambiar— se pueden consultar en la Tabla B.2 del anexo B. En la Tabla B.3 se presentan, a modo de ejemplo, los contenidos de un máster típico del programa de postgrado sobre temas de control, que tiene una duración de entre uno y dos cursos académicos (entre 60 y 120 créditos ECTS).

La mayoría de los estudios de máster que se imparten en las universidades españolas están relacionados directamente con un programa de doctorado, que constituye el tercer ciclo de los estudios superiores. Respecto a estos estudios de doctorado, para su acceso se exige únicamente un mínimo de 60 créditos ECTS en programas oficiales de posgrado o la posesión del título oficial del máster, siempre que se haya completado un mínimo de 300 créditos en el conjunto de los estudios universitarios de grado y posgrado. Los estudios oficiales de posgrado conducentes a la obtención del título de doctor consisten en la elaboración de una tesis doctoral bajo la supervisión de algún o algunos doctores sobre un tema original e inédito. La actual legislación no contempla enseñanzas regladas de ningún tipo en este periodo.

Por último, es necesario comentar el impacto de estos conocimientos de automática en otras titulaciones donde no se recogen de forma explícita estos términos. Los conceptos y principios del control automático, o de la ingeniería de sistemas en general, se usan hoy en día en ramas del conocimiento muy distintas. Además de áreas relacionadas de forma directa como la física, química, electrónica, informática, investigación operativa, etc., actualmente se está aplicando en otros campos donde ha pasado a tener un papel relevante, como la biología, la genética, la economía, el marketing, etc. Esto muestra la potencialidad y las ventajas de lo que supone incluir esta materia en otros títulos de grado no tan específicos del área, y muestra una vez más el carácter horizontal de la misma. A su vez, esta amplitud de posibles aplicaciones exige a los profesores o formadores en control a que hagan un esfuerzo por conocer con cierta profundidad el ámbito en el que van a aplicar los conceptos generales del control, y que estén abiertos a la colaboración y a un trabajo conjunto con especialistas de otros campos.

5.1.4. Formación continua

El desempeño profesional demanda una serie de necesidades de formación. Por un lado, desde hace unas décadas se viene propiciando la formación continua de los empleados u operarios dentro de una empresa o entidad. Habitualmente se requiere una actualización de conocimientos acorde con el desarrollo de nuevas tecnologías, cuando no una formación específica y avanzada sobre alguna herramienta, equipo o instalación . Junto con esto, la incorporación laboral de nuevos profesionales exige una adecuación de sus conocimientos al trabajo que van a realizar, y que con frecuencia conlleva la impartición de cursos dentro del ámbito concreto en el que se va a desarrollar.

En el campo del control automático hay empresas proveedoras de nuevos productos comerciales de control de procesos, automatización, software de producción, etc., que ofrecen cursos específicos para instalación y manejo de sus herramientas. Esos cursos son en muchos casos cerrados en sus programas y en su alumnado, pues vienen a resolver una necesidad muy concreta. Del correcto uso de estos productos dependerá el grado de satisfacción del cliente y la difusión de los mismos, por lo que esta enseñanza suele ser impartida por técnicos que han desarrollado esos elementos o que tienen un conocimiento profundo de su funcionamiento.

Otros cursos impartidos en empresas responden a una necesidad de formación más general y puntera, con idea de impulsar la investigación o mejorar el rendimiento de forma significativa con sistemas avanzados y novedosos de control. En estos casos con cierta frecuencia es la misma universidad la que imparte estos cursos de carácter más generalista. Estos cursos están dirigidos habitualmente a alumnos con un perfil muy determinado (profesionales técnicos, personal de mantenimiento, ingenieros de proyectos, etc.) lo

que facilita la elaboración del programa, la distribución de contenidos y la orientación más o menos práctica según el interés de la empresa o centro de producción que la demande. Especial importancia suele tener en estos casos la documentación entregada a los alumnos, que puede ser desde un manual de uso hasta unas transparencias donde se han abordado problemas concretos.

También existen los másteres de carácter profesional, la mayoría centrados en aplicaciones industriales. Suelen tener un marcado contenido práctico y de habilitación. Al tener un número relativamente bajo de alumnado puede realizar prácticas con material específico de altas prestaciones. Un claro ejemplos es el Máster de Instrumentación y Control de Procesos desarrollado para profesionales por la Sección Española de ISA. Esta asociación, entre otras muchas actividades, organiza numerosos cursos tanto de carácter técnico como divulgativo y publica libros y artículos técnicos, también con finalidad docente.

Mención aparte merecen también los cursos impartidos por entidades en las que se trabaja e investiga en el área del control automático, fundamentalmente en investigación aplicada. Son cursos especializados, generalmente avanzados, con un nivel que podría equiparase al de posgrado, para licenciados o investigadores interesados. Tienen diversos formatos: escuelas de verano, de invierno, seminarios de trabajo en temáticas específicas, etc. Estos cursos, de corta duración, tienen un enfoque divulgativo y van dirigidos tanto a alumnos del ámbito académico como del industrial. Dentro de éstos cabría destacar, por el prestigio de las instituciones que los respaldan:

Los Cursos de Especialización en Automática organizados por CEA (Comité Español de Automática)

Los cursos de especialización en automática han tenido lugar en seis ocasiones, durante los años 2000 a 2005, en diversas sedes. Algunos estuvieron centrados en temas más básicos y generales de la regulación y otros han sido más especializados. Han contado con ponentes de reconocido prestigio, y en ellos se ha fomentado, además de la difusión de conocimientos avanzados en temas de control, el intercambio general de experiencias y conocimientos entre los asistentes.

• Conferencias divulgativas organizadas por CEA

Las conferencias tratan de desarrollar aspectos concretos de los diversos campos de la automática. Cabe destacar las que tienen lugar en el marco de las Jornadas de Automática, evento convocado anualmente por CEA, así como las Jornadas, Seminarios, Reuniones, etc., organizadas por los diversos grupos de trabajo de esta asociación, especialmente los que hacen referencia de forma directa al control automático.

Conferencias y seminarios a cargo de profesores invitados

Con motivo del impulso que se está dando los últimos años a la movilidad para favorecer la colaboración con centros de investigación y universidades de otros países, están teniendo lugar desde hace unos años una serie de seminarios y conferencias en diversas universidades españolas, algunos dentro del marco de los programas de doctorado con Mención de Calidad, sobre aspectos específicos y avanzados del control automático.

Cursos, conferencias y seminarios organizados por el Capítulo Español Conjunto IAS/CSS del IEEE

Se debe destacar el Seminario de Aplicaciones Industriales de Control Avanzado (SAICA) que anualmente se celebra en España, y que se plantea como un foro de encuentro entre la industria y la universidad para compartir conocimientos y experiencias en las técnicas de control más avanzadas, especialmente de aquellas que han sido o empiezan a ser objeto de aplicación en la industria. También es necesario nombrar los cursos convocados por los colegios profesionales, sobre todo los de ingenieros.

Respecto a los recursos de formación en control automático, son innumerables los diversos materiales desarrollados para cubrir esta enseñanza. Hay más de 4000 títulos sobre ingeniería industrial servidos por distribuidoras de libros. Además de los libros y revistas del área, muchos de los cuales están ampliamente difundidos en las universidades españolas y otros centros de formación, se viene desarrollando últimamente una gran cantidad de material audiovisual, electrónico, software y hardware para prácticas, laboratorios virtuales y remotos, etc.

Existen también los repositorios en Internet donde se encuentran manuales de programas de desarrollo de sistemas de control, software de libre distribución, demostraciones, ejercicios, apuntes, guiones de prácticas, ejemplos...

Dentro de los recursos de formación cabe destacar los **Cuadernos Técnicos** generados por CEA. El objetivo de este material es aumentar la proyección de la comunidad académica y científica de control cara a la industria española. Este servicio al sector industrial es un acercamiento necesario que la sociedad demanda de las Universidades y centros de investigación. Son cuadernos técnicos «de bolsillo» que nacen con la vocación de ser una referencia básica obligada en la industria y para su amplia difusión y uso. La intención de esta iniciativa es facilitar el acercamiento y la comprensión de temas avanzados y despertar el interés del lector especializado del ámbito profesional.

5.1.5. Educación a distancia

Actualmente, dentro de la globalización que caracteriza a la sociedad actual, se facilita el aprendizaje no sólo incorporando nuevas tecnologías y procedimientos docentes más acordes con la mentalidad de los alumnos, sino proporcionando la información necesaria para que la enseñanza llegue a todos los rincones sin exigir un desplazamiento de los interesados. De ahí el auge de la metodología de educación a distancia, que se ha visto apoyada por medios técnicos que han permitido implementar contenidos y prácticas de forma que estuviera accesible a los alumnos de forma casi inmediata, así como abrir cauces de comunicación entre alumnos y profesores, y entre los mismos estudiantes.

En general, dentro del campo del control automático no hay una gran oferta en este sentido. Así como en otras áreas de conocimiento hay mucho material desarrollado, quizás al ser la automatización de procesos una materia técnica con una eminente vertiente práctica, la presencia de este tipo de cursos es relativamente escasa.

Los cursos a distancia que se ofertan actualmente suelen estar dirigidos a personal técnico, así como a profesionales que quieran adquirir, mejorar o actualizar sus conocimientos en la materia habitual de su trabajo, y están muy orientados a la práctica (instalaciones, diagramas de planta, etc.). Son cursos que no exigen un seguimiento continuo de los alumnos ya que la mayoría facilitan un manual de texto o tutorial con un CD donde se incluyen ejemplos, prácticas y ejercicios para que el alumno desarrolle por su cuenta. La mayoría de los que llevan en el título el término control hacen referencia a automatismos (generalmente eléctricos), así como a materiales, mantenimiento, producción, etc. La duración media es de 6 a 8 horas. Los contenidos de aprendizaje de estos cursos están orientados a la aplicación directa de controladores más que al análisis o diseño de los mismos.

Cabe destacar dos instituciones universitarias representativas en este sentido. Por un lado, la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED) como pionera, y más recientemente, la *Universitat Oberta de Catalunya* (UOC). La UNED, creada en 1972, es actualmente la primera universidad de España por número de estudiantes y por experiencia y prestigio en enseñanza a distancia. Tiene centros asociados en todos los continentes y ha desarrollado a lo largo de estos años plataformas virtuales y audiovisuales que permiten aprender a distancia, facilitando la comunicación entre los alumnos y con los profesores. Respecto al ámbito de control, tiene virtualizadas numerosas asignaturas de esta materia tanto de grado como de posgrado. La UOC es una universidad privada no presencial con sede en Barcelona, con centros y puntos de apoyo fundamentalmente en Cataluña y algunos en el resto de España, Andorra y en Cerdeña.

Una de las más interesantes iniciativas en este contexto es AutomatL@bs, una red interuniversitaria de laboratorios virtuales/remotos que coordina la UNED para la ense-

ñanza de la automática en general y específicamente del control. Resulta de la integración de los recursos que aportan las universidades que participan en este proyecto, desarrollados con un mismo esquema de trabajo para facilitar a los alumnos que puedan realizar prácticas de manera autónoma con sistemas reales sin que sea necesario conocer la localización del experimento.

5.2. Relación entre el mundo académico y la industria

Este apartado trata de reflejar algunas ideas sobre la relación, a nivel de formación, del sector académico del control automático con la industria en el contexto nacional.

En otras partes de este libro se ha puesto de manifiesto la presencia e importancia del control automático en la actividad industrial, siendo difícilmente concebible hoy día un proceso de producción puramente manual que no incorpore la automatización de sus máquinas o equipos y el intercambio y uso de información de planta. De igual forma, de forma creciente, muchos productos (coches, electrodomésticos, etc.) incorporan funcionalidades soportadas por dispositivos automáticos.

La presencia de la automatización es pues tangible a través de los dispositivos y sistemas que implementan las funciones del control automático. A veces en forma claramente visible, como las salas de control de la industria de procesos, y a veces de forma indirecta como los sistemas embebidos en un chip en ciertos productos. En todo caso, esa preponderancia de la visibilidad a través de los elementos de implementación explica su inclusión dentro del ámbito de las TIC (Tecnologías de la Información y las Comunicaciones). Esto se une al hecho de que la automatización de un sistema es, básicamente, un tratamiento de la información proporcionada por los sensores para determinar la forma adecuada de operar sobre el sistema a fin de conseguir unos determinados objetivos.

No obstante, otro aspecto fundamental del control automático tiene que ver directamente con ese proceso de toma de decisiones que es relativamente independiente de la implementación final y es el que le confiere su personalidad y generalidad. La metodología empleada en el diseño de lazos de control, particularmente en la educación universitaria, parte de una descripción de objetivos y una caracterización de la dinámica del sistema a controlar, típicamente plasmada en un modelo. Todo ello requiere un buen conocimiento de dicho sistema y es la parte más específica ligada al tipo de aplicación considerada. Después la teoría del control automático, que se mueve en el terreno general de las matemáticas, proporciona las pautas para el diseño de los controladores o elementos de decisión y para el análisis de su comportamiento en lazo cerrado, los cuales han de implementarse teniendo en cuenta de nuevo las características físicas (tipo de sensores y accionadores, velocidad de proceso, tamaño, etc.) del sistema.

Ahora bien, el control automático es ya una tecnología madura y, como tal, muchos de los procedimientos, modelos, sistemas, etc. que se emplean en sectores industriales donde la automatización no es una novedad están consolidados, y una de las competencias que la industria espera de los profesionales salidos de la Universidad es que los conozcan y sepan aplicarlos, y, en particular, que conozcan también las tecnologías que permiten su implementación y mantenimiento.

En este sentido hay que decir que, en términos generales, el control automático en buena parte de Europa y en España está organizada en Departamentos de Control en torno a las ideas generales y comunes en torno a la dinámica y los controladores lo cual no favorece la enseñanza en la especificidad de cada campo de aplicación sino en la generalidad de conceptos y métodos. En todo caso, tenemos colectivamente una asignatura pendiente a nivel de grado que se traduce en prestar más atención a la formación en instrumentación, a la implementación de los sistemas de control, a la informática industrial, a la seguridad y normativa, al mantenimiento y a la gestión de proyectos en este campo. Los cambios en los planes de estudios abiertos por el proceso de Bolonia no invitan al optimismo, pero son una magnífica ocasión para reorientar la enseñanza básica de la automática, combinando los conceptos básicos de dinámica, estabilidad, realimentación, control, etc. con otros aspectos más prácticos de su implementación en un área o campo determinado.

Ello pondría en mejores condiciones a los graduados y contribuiría a mejorar la imagen de la Universidad, a acercar y reforzar la cooperación con las empresas en el campo de la automatización. Esta cooperación es claramente conveniente para la empresa, pero es esencial para los profesores que quieran mantener un conocimiento adecuado del medio en que ejercerán sus alumnos y para mantener los estándares y contenidos de la enseñanza de grado al nivel profesional adecuado. Es un camino de recorrido conjunto a cuyo trazado debemos colaborar.

5.3. En el contexto internacional

En este apartado se analiza el estado de la formación en aspectos relacionados con control automático en el contexto internacional. Normalmente también en otros países la formación pre-universitaria se realiza hasta los 18 años en escuelas elementales, media y superior. Se observa cómo, de forma similar a lo que pasa en España (en ESO y Bachillerato), es casi general la inexistencia de contenidos relacionados con control en estudios básicos o de pre-universidad y en caso de encontrarse, estos son de carácter divulgativo y de carácter general.

De forma similar a lo que existe en España con la Formación Profesional, pueden encontrarse escuelas técnicas (por ejemplo en Estados Unidos las *Technical High School*), en las que se realizan estudios técnicos que capacitan al estudiante para poner en marcha y mantener instalaciones automáticas y de control en aplicaciones industriales o de servicio. En general la formación adquirida permite comprender y abordar aspectos generales de automatización y control para el uso y mantenimiento de la aplicación, pero no les capacita para abordar tareas de diseño o innovación durante la vida profesional.

También de forma similar a lo que ocurre en España, la formación relevante en aspectos relacionados con control se imparte en estudios universitarios. Resulta imposible el análisis de todas las universidades del mundo, incluso el de todas las de algunos países de referencia por la gran diversidad de titulaciones y planes de estudio en titulaciones de grado o máster. Se han seleccionado, por tanto, algunos países y dentro de estos sus universidades más destacadas haciendo uso del ranking de universidades que aparece en el Academic Rank of World Universities y el Ranking Mundial de Universidades en la Web.

Se toman como referencia las palabras clave que aparecen en las áreas técnicas definidas por IFAC. Dado que este espectro de palabras clave es también muy amplio, se tienen en cuenta las materias dentro de titulaciones de grado y postgrado que incluyen las palabras control y automática. Así aparecen materias como Teoría de control, Sistemas de control o Control óptimo que tienen esta palabra directamente en el título y asignaturas como Simulación de sistemas, Procesos de estimación o Robótica que la tienen en el interior del temario y que entran dentro de las áreas técnicas definidas por IFAC, antes comentadas. El peso relativo de materias relacionadas con control con respecto al total de materias se expresa en tanto por ciento, con el objetivo de que el lector pueda hacerse una idea rápida de su importancia en cada titulación.

Los países analizados son algunos del entorno europeo que son miembros del G8, como Francia o Reino Unido. Europa está actualmente en un proceso de cambio de los estudios universitarios para adaptarse a la Declaración de Bolonia de 1999 por lo que existen variaciones de títulos y duración entre unos países y otros, e incluso dentro del mismo país. También se comentan algunas universidades de Estados Unidos y países de América Latina.

El Reino Unido organiza los estudios de ingeniería en BEng (3 años), MEng (4años) por áreas de conocimiento (Subjects). Fundamentalmente aparecen materias relacionadas con el control automático dentro de Electrical and Electronic Engineering en la que se imparten por ejemplo Electrical and Electronic Engineering o Mechatronic Engineering, que tienen asignaturas de fuerte entronque en automática y control (Signals and Systems, Control Systems I, Control Systems II or Nonlinear Control Systems, etc.) y otras como Robotics o Sensors and Actuators (la carga aproximada de las materias relacionadas con

control es del 10%). Hay otras titulaciones en las que el control tiene una presencia mucho menor y en las que se intuye una formación básica en estos temas (5% aprox.), como por ejemplo Computer Science Engineering, Electronic Systems Engineering, or Communication Systems Engineering, en los que aparecen las asignaturas Signals and Systems, Distributed Systems, Real Time Systems, Image Engineering and Pattern Recognition. La especialización suele encontrarse en estudios de posgrado, MSc (1 año). Dentro del área de Electrical and Electronic Engineering aparecen máster específicos como por ejemplo el MSc Advanced Control and Systems Engineering (University of Manchester) que tiene el 80% de los contenidos relacionados con control. Sin embargo también puede encontrarse, en algunos casos, especialización en temas relacionados con control en un dominio específico desde el inicio del MEng. Así en Newcastle University es posible elegir MEng Process Control dentro Chemical Engineering que tiene una orientación de especialización en control dentro de Química.

El sistema universitario de Francia es de una gran diversidad. Así hay Universidades, en las que se enmarcan los Institutos politécnicos y los Institutos universitarios, y Escuelas de educación superior con Grandes Escuelas (*Grandes Écoles*), que imparten un *Diplome d'Ingenieur* (tres años de estudio, tras dos años de preparatorio selectivo) que tienen un gran prestigio en Francia, y Escuelas normales superiores (ENS). El sistema universitario se ha adaptado al marco grado y posgrado de Bolonia aunque a las Grandes escuelas se les ha dejado cierta autonomía.

Materias relacionadas con control aparecen en las titulaciones de Génie electronique, Genie informatique o Génie électrique. Por ejemplo esta última tiene en Paris-Sud 11 asignaturas relacionadas con control: Traitement du signal, Automatique o Contrôle de processus industriels en un porcentaje aproximado del 15%. En la titulación, Génie Informatique, donde se imparte una formación básica en control a través de asignaturas como Modélisation et simulation y Robotique. En esta misma Universidad se ofrecen varios másteres que permiten una especialización mayor en el área de automática y control. El Máster Ingénierie mathématique con especialidad en Automatique, simulation, visualisation (30 % de materias relacionadas con control). El Máster Information, systèmes et technologie con sus especialización en Automatique et Traitement du Signal et des Images y Système pour l'énergie électrique (2 años) permiten una mayor profundización en control (50 %) con asignaturas como Commande et estimation par variables d'état des systèmes linéaires, Comportement des solutions de systèmes dynamiques, Commande des systèmes non-linéaires et planification de trajectoir.

En Estados Unidos el control de la educación está fuertemente descentralizado y es ejercido por los estados y los distritos locales. Las universidades tienen, en general, reconocido un alto nivel académico. Hay que pasar de la número 25 en el Ranking Mundial de Universidades en la Web para encontrar una no estadounidense. Los estudios universita-

rios comienzan con estudios de BEng (normalmente cuatro años). Posteriormente se puede realizar el máster (normalmente un año) y el doctorado. Hay que destacar que los estudiantes tienen un amplio abanico de posibilidades de elección a la hora de diseñar su currículo desde el primer momento, debido a la gran flexibilidad de los programas de estudios. Se pueden encontrar asignaturas relacionadas con control en los grados de Electrical Engineering, Mechanical Engineering, Chemical Engineering, o Aeronautics and Astronautics con una carga aproximada del 10% del total. La especialización se obtiene dentro de los estudios de MSc. Por ejemplo, en Stanford University cada estudiante de máster puede preparar una trayectoria a la carta y es posible obtener una especialización en Control and System Engineering (80% de asignaturas relacionadas con control) dentro del Electrical Engineering. Se ofertan asignaturas básicas comunes como, Introduction to Control Design Techniques, Control System Design, Linear Control Systems I, II, III, Analysis and Control of Nonlinear Systems, Robust Control, Advanced Topics in Computation for Control. Además cada programa de estudios tiene sus propios cursos orientados a sus propios objetivos de competencias Advanced Robotics dentro de Computer Science; Optimal Control Theory with Applications in Economics dentro de Management Science and Engineering; Vehicle Dynamics and Control dentro de Mechanical Engineering. En la titulación de Aeronautics and Astronautics, los estudios de máster tienen también bastantes posibilidades de optatividad y los alumnos pueden elegir por ejemplo ocho asignaturas entre veintidós disponibles de las que seis están relacionadas con control. Un ejemplo de alta especialización es el grado de Control and Dynamical Systems impartido en California Institute of Technology que permite un currículo de grado completo y coherente con oportunidades de investigación teóricas y de aplicación en el ámbito del control de sistemas.

La Universidad de Buenos Aires es la más prestigiosa de Argentina. Entre sus titulaciones de grado (6 años) hay varias en las que imparten asignaturas con contenidos relacionados con control (entre 10% y el 15%): Ingeniero electricista, Ingeniero en electrónica, Ingeniero en mecánica, Ingeniero industrial e Ingeniero en informática. Algunas de estas asignaturas son Señales y sistemas, Sistemas de control o Automatización industrial. Además es posible alcanzar mayor especialización con asignaturas optativas como Teoría de control I, Teoría de control II, Control industrial distribuido, Identificación y control adaptativo, Robótica, Simulación de sistemas de control, Control óptimo, Control Robusto y Control digital.

Respecto a estudios de posgrado, la Universidad de Buenos Aires ofrece titulaciones de Máster en Matemáticas con especialización en Control (60% de materias relacionadas con control) y Máster en Simulación numérica y control (80%). En estas titulaciones de máster se puede obtener una alta especialización con asignaturas como Modelos y sistemas, Control no-lineal, Diseño robusto de sistemas de control, Simulación de sistemas de control, Control Óptimo, Control Robusto y Control Digital.

También México tiene un sistema universitario con prestigio en América Latina y su Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM está bien posicionada (posición 150-200 en el ranking mundial. En este ranking la primera española es la Universidad de Barcelona 150-200 y la siguiente la Universidad Autónoma de Madrid 200-300). Dentro de UNAM son varias las titulaciones de grado en las que se imparte algún contenido obligatorio relacionado con control y automatización en asignaturas como Fundamentos de control, Sistemas de control, Instrumentación y control, Análisis de sistemas y señales o Elementos de control. Adicionalmente, en estas titulaciones de grado se tiene una amplia posibilidad de extender los conocimientos en el área con asignaturas optativas como Control avanzado, Control automático industrial, Control de sistemas no lineales, Robótica, Robots móviles y agentes inteligentes, Automatización industrial y control distribuido. El porcentaje aproximado de créditos relacionados con control que un alumno puede cursar en cada una de estas titulaciones es 20% en Ingeniería eléctrica y electrónica, 12% en Ingeniería de computación, 10% en Ingeniería industrial, 10% en Ingeniería mecánica, 15% en Ingeniería mecatrónica y 5% en Ingeniería de telecomunicaciones. Con relación a estudios de posgrado hay varias maestrías donde se abordan contenidos de control y automática. En particular una maestría en Control Automático en la que el total de las asignaturas técnicas están relacionadas con control, tales como Modelado e identificación de sistemas dinámicos. Análisis de sistemas lineales. Análisis de sistemas no lineales. Diseño de esquemas de control para sistemas no lineales, Neurocontrol, Control adaptable, Robótica y sistemas de manufactura, Control de procesos estocásticos. En otros programas tales como Procesamiento Digital de Señales también hay una componente de materias relacionadas con control automático, con una carga aproximada del 30%.

En el contexto de la enseñanza a distancia y gracias al avance de la tecnología educativa cada vez más universidades ofertan cursos en esta modalidad. En general las posibilidades de formación a distancia (*e-learning*) en otros países es bastante amplia y casi todas las universidades de prestigio ofrecen esa posibilidad también para estudios relacionados con Ingeniería de Control. Estados Unidos ha sido pionera y algunos ejemplos son *University of Washington*, *Indiana State University*, *Oklahoma State University*, que ofrece un máster específico de *Science in Control Systems Engineering*.

A modo de resumen puede decirse que en los países analizados, las materias relacionadas con el control en grado y posgrado aparecen en titulaciones de Ingeniería Eléctrica, Ingeniero en Mecatrónica, Ingeniero en Informática, Ingeniero Civil, Ingeniero Químico o Ingeniero Aeronáutico. El peso relativo en estas titulaciones de las asignaturas relacionadas con control está entre el 5% y el 20% y normalmente un poco mayor que en las titulaciones equivalentes de grado de España. Esto es más destacado en los países de América Latina en las que se aprecia bastante énfasis en los temas de control automático durante el grado.

Sobre todo destaca que en casi todos los países de referencia, es posible realizar estudios de posgrado más específicos para especializarse en algún dominio de investigación o aplicación relacionado con el control automático. Existen cursos de máster con un fuerte énfasis en temas de control genéricos, esto es sin un dominio concreto de aplicación, tales como los de Máster en Control Automático, de México, el Control Avanzado e Ingeniería de Sistemas, del Reino Unido o el Máster de Simulación Numérica y Control, de Argentina. También en dominios específicos de aplicación como el Máster de Sistemas Tecnologías e Informática, de Francia o en el dominio Aeronáutico y Espacio de Estados Unidos.

6

Análisis de la I+D+i en control automático

Existen campos tradicionales de aplicación del control automático (vehículos aéreos y aeroespaciales, industria de procesos, robótica, etc.) en los que se plantean nuevos retos ante la demanda creciente por la sociedad de soluciones cada vez más fiables, eficientes, ecológicas y baratas. Además, en estos campos se tratan de abordar nuevos problemas cada vez más complejos y en los que la información disponible sobre el comportamiento dinámico es cada vez menor. Por otra parte, aparecen campos en los que el control se está introduciendo y en el que a largo plazo puede tener una importancia decisiva, como son los campos de la biología, de los sistemas cuánticos, de la nano-tecnología, de las ciencias ambientales y otros que puedan ir apareciendo en el futuro. La historia enseña que las mejoras tecnológicas en coste, capacidades o introducción de nuevos elementos en los aspectos básicos de todo sistema de control (medida, cálculo y actuación) propician nuevos desarrollos y amplifican el campo de aplicación del control automático a nuevos campos que hace bien poco no resultaban atractivos. Los desarrollos científicos y tecnológicos están permitiendo la manipulación de elementos inimaginables hasta ahora, lo que está propiciando el uso del control en numerosas aplicaciones. También los desarrollos en otros campos del conocimiento como la Inteligencia Artificial, la Informática, la Matemática, tienen una influencia decisiva sobre el desarrollo del control, al proporcionar nuevas herramientas y metodologías que permiten ir ampliando las posibilidades del mismo.

6.1. En el contexto internacional

No es tarea fácil determinar con precisión cuáles son las líneas de investigación y acciones estratégicas en control automático en el mundo ya que desgraciadamente la información que se precisa para realizar estos estudios no suelen estar accesible.

La aproximación que se ha efectuado es hacer un estudio de las tendencias que se están manifestando en investigación en control automático en los últimos años. Un análisis prospectivo de estas tendencias puede dar pautas de cómo se está configurando en

estos momentos la investigación y cuáles son los campos emergentes hacia los cuales la comunidad investigadora está dirigiendo su atención prioritaria.

Con el fin de sistematizar el análisis en la medida de lo posible se ha tomado la clasificación de campos y materias que la *International Federation of Automatic Control* (IFAC) tiene establecida (ver Tabla A.1 en Anexo A). Esta clasificación tiene una correspondencia muy estrecha con la que ha realizado el IEEE para estas materias tal como se deduce del análisis comparativo que se proporciona en la Tabla A.2 del Anexo A.

En el estudio se han analizado los tres indicadores siguientes:

- Análisis de los principales congresos internacionales de control automático.
- Análisis de los trabajos publicados en revistas relevantes en el campo del control automático.
- Líneas de investigación en control de universidades del índice ARWU.

6.1.1. Análisis de los principales congresos de control automático

Con la finalidad de conocer cuál ha sido la evolución de los campos de interés en el área del control automático, se ha analizado la estructura de las sesiones de los congresos más representativos en un horizonte temporal de 10 años (desde 1999 hasta 2008). Para ello, se ha utilizado la clasificación de áreas temáticas de IFAC recogida en la Tabla A.1 del anexo A, donde se han incluido dos nuevas áreas temáticas para tener en cuenta aspectos o campos de interés parcialmente contemplados en la clasificación general de IFAC.

Del análisis de la clasificación de temáticas de IFAC también se infiere que la adscripción de una sesión temática de un congreso a alguna de dichas temáticas no es tarea fácil, dado que en muchas ocasiones una misma sesión se puede encuadrar en más de un campo y por tanto el proceso de clasificación se ve influenciado por la subjetividad del que lo realiza. En cualquier caso, la mayor parte de las secciones tiene un encuadre claro en alguno de los campos y los resultados de la interpretación de la clasificación pueden ser válidos. Los congresos analizados han sido los siguientes: IFAC World Congress (IFAC), IEEE Conference on Decision and Control (CDC), American Control Conference (ACC), European Control Conference (ECC), Asian Control Conference (ASCC).

Los datos de partida del análisis se recogen en la tabla 6.1 y de forma gráfica en la figura 6.1, donde se muestra el peso que cada campo de la clasificación IFAC ha tenido a lo largo de la ventana temporal 1999-2008. Partiendo de esta información de base por congreso y año, las principales conclusiones del análisis se detallan en el Anexo Web 1, donde se sitúan una serie de tablas que indican la evolución temporal en porcentajes de las

temáticas principales en los congresos citados. Como se puede observar, los campos con mayor porcentaje de sesiones son los dedicados a Sistemas y Señales y a Métodos de Diseño, mientras que los denominados Sistemas Sociales y los Sistemas Biológicos y Ecológicos son los que menos ocurrencias tienen, si bien en este último caso se puede observar una tendencia suave de crecimiento en los últimos años. La misma tendencia de crecimiento la tienen los Sistemas de Transporte y Vehículos y la denominada de Otros campos. Los Sistemas y Procesos de Potencia y los Sistemas de Manufactura y Logísticos se mantienen en niveles equilibrados mientras que el campo de Computadores, Cognición y Comunicación, que siempre ha ocupado un lugar predominante, muestra una ligera tendencia negativa en los últimos años.

El lector interesado puede consultar el Anexo Web 1. La figura 1 de este anexo muestra la misma información particularizada para cada uno de los congresos tratados, mostrando las tendencias globales que se han comentado previamente, alcanzando en los congresos recientes el primer lugar la temática de Sistemas y Señales en detrimento de los Métodos de Diseño. Las figuras 2 a 12 del Anexo Web 1 muestran la evolución del porcentaje promedio de las temáticas de interés. También se realiza en dicho anexo un análisis en detalle de subcampos dentro de algunos campos de interés. Las figuras 13 a 23 del Anexo Web 1 muestran esta información, donde los porcentajes siguen siendo relativos al total de sesiones del congreso de referencia.

Clasificación de IFAC	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Sistemas y Señales (%)	20,4	21,7	23,3	18,7	22,0	25,8	22,6	25,6	27,4	22,9
Métodos de Diseño (%)	29,0	29,4	30,3	28,8	28,5	22,2	25,5	22,6	22,5	15,4
Computadores-Cognición– Comunicación (%)	8,0	11,4	6,5	10,1	8,3	11,1	6,5	7,2	8,6	3,8
Mecatrónica, Robótica y Componentes (%)	4,8	5,3	4,6	6,3	3,5	3,3	5,9	9,6	4,6	6,6
Manufactura y Sistemas Logísticos (%)	5,5	6,4	4,4	5,2	4,8	6,2	4,6	3,2	3,8	4,9
Sistemas de Potencia y Proceso (%)	9,6	4,1	7,8	7,9	7,6	4,1	8,2	7,3	6,2	8,1
Sistemas de Transporte y Vehículos (%)	7,0	7,3	6,8	7,2	8,2	10,5	9,3	10,0	8,3	15,2
Sistemas Biológicos y Ecológicos (%)	2,5	1,3	2,5	1,9	2,4	2,4	5,3	2,2	3,6	3,8
Sistemas Sociales (%)	3,2	0,9	1,8	2,9	1,7	0,8	2,3	0,8	1,6	2,3
Otros Campos (%)	5,8	5,8	7,4	4,9	8,5	6,8	6,9	8,3	9,5	12,0
Aplicaciones de Control (%)	4,3	6,5	4,6	5,9	4,4	6,9	3,1	3,4	4,0	4,9

Tabla 6.1. Clasificación completa de sesiones por años y congresos representativos en porcentaje.

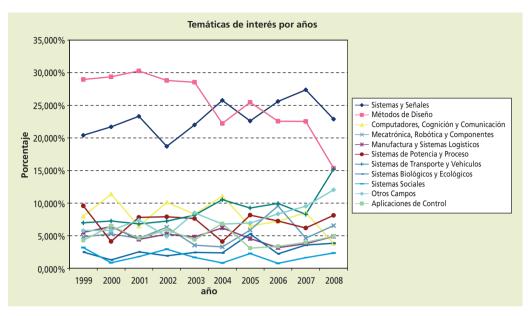


Figura 6.1. Gráfico de evolución por temáticas de la clasificación IFAC.

6.1.2. Análisis de los trabajos publicados en revistas relevantes en el campo del control automático

En la misma línea que lo realizado con los principales congresos de control automático, se ha efectuado un análisis de los trabajos que se han venido publicando en el intervalo 1999-2008 en algunas de las revistas más importantes de control automático. Se han escogido tanto revistas donde se publican fundamentalmente resultados teóricos como revistas orientadas a la publicación de aplicaciones industriales. En concreto, las revistas escogidas en el primer grupo han sido Automatica, IEEE Transactions on Automatic Control (IEEE TAC), International Journal of Control (IJC) y European Journal of Control (EJC), aunque en dichas revistas también se publican artículos de aplicación. En el segundo grupo se han escogido Control Engineering Practice (CEP), IEEE Transactions on Control Systems Technology (IEEE CST) y Journal of Process Control (JPC). En esta última también se publican resultados teóricos.

La tabla 6.2 y la figura 6.2 contienen información sobre el peso que cada campo de la clasificación de IFAC ha tenido a lo largo del horizonte estudiado 1999-2008, escogiendo datos promediados de las revistas de corte teórico y en la tabla 6.3 y la figura 6.3 para las de corte práctico. En el anexo Web 2 se hace un análisis en profundidad y las figuras 1 y 2 de dicho anexo muestran la misma información que en este apartado pero individualizada por revista. Como comentario general, se puede señalar que en las revistas de corte

Clasificación de IFAC	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Sistemas y Señales (%)	28,0	24,8	24,6	26,6	28,1	16,3	29,0	27,3	25,6	29,9
Métodos de Diseño (%)	48,5	44,9	43,0	47,4	39,9	35,9	33,1	37,0	30,1	35,2
Computadores-Cognición– Comunicación (%)	6,1	3,3	6,4	5,4	6,1	5,3	5,6	5,9	5,0	3,8
Mecatrónica, Robótica y Componentes (%)	4,1	4,5	2,9	1,7	1,8	7,3	3,9	3,8	3,3	2,6
Manufactura y Sistemas Logísticos (%)	0,9	2,5	1,0	2,1	3,3	3,1	1,6	1,9	2,4	2,4
Sistemas de Potencia y Proceso (%)	2,0	4,1	7,2	4,2	3,6	10,5	4,1	4,0	3,9	4,3
Sistemas de Transporte y Vehículos (%)	1,8	5,1	5,2	2,3	4,2	8,2	5,7	6,2	9,3	4,2
Sistemas Biológicos y Ecológicos (%)	0,0	0,1	0,1	1,3	1,9	0,5	4,4	0,4	1,2	2,9
Sistemas Sociales (%)	0,0	2,1	1,4	0,7	1,3	0,1	0,2	1,6	7,0	0,3
Otros Campos (%)	8,7	8,5	8,2	8,2	9,8	12,8	12,4	11,8	12,1	14,4
Aplicaciones de Control (%)	1,7	1,5	2,8	2,5	4,3	4,0	1,0	2,1	2,8	1,7

Tabla 6.2. Clasificación completa promedio de artículos por años en revistas de corte teórico (Automática, IEEE TAC, IJC, EJC).

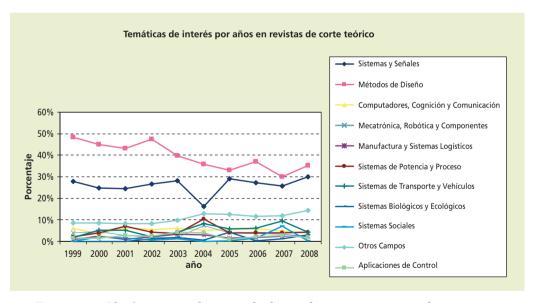


Figura 6.2. Clasificación completa promedio de artículos por años en revistas de corte teórico (Automática, IEEE TAC, IJC, EJC).

teórico el campo de Métodos de Diseño ha sido siempre en porcentaje el más preponderante, seguido del de Señales y Sistemas. Esto es lógico puesto que la mayoría de avances en la teoría se producen en esos campos. Mientras que el campo de Señales y Sistemas se

Clasificación de IFAC	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Sistemas y Señales (%)	15,0	14,5	22,1	16,5	12,6	15,1	11,3	14,4	10,6	18,4
Métodos de Diseño (%)	22,0	18,6	17,0	16,6	20,2	13,8	18,0	11,7	15,0	14,0
Computadores-Cognición– Comunicación (%)	5,9	6,7	5,4	7,0	4,6	5,2	5,1	5,5	5,5	4,7
Mecatrónica, Robótica y Componentes (%)	8,2	4,0	5,7	11,5	3,7	8,2	7,0	6,2	4,7	5,7
Manufactura y Sistemas Logísticos (%)	9,9	9,5	11,7	5,4	9,5	11,8	9,3	7,7	8,7	7,5
Sistemas de Potencia y Proceso (%)	14,3	23,0	13,3	12,8	15,8	16,1	24,3	20,5	13,6	18,1
Sistemas de Transporte y Vehículos (%)	13,3	13,5	11,4	12,0	16,1	11,5	9,2	16,3	14,6	12,9
Sistemas Biológicos y Ecológicos (%)	2,1	2,3	1,6	7,7	4,9	9,4	6,2	4,7	8,4	6,8
Sistemas Sociales (%)	1,3	1,4	0,7	1,3	1,6	0,3	0,0	1,5	0,0	0,7
Otros Campos (%)	7,8	6,4	11,1	9,1	11,1	8,7	9,5	11,5	18,8	11,2
Aplicaciones de Control (%)	8,7	5,3	5,4	8,6	5,9	7,7	8,9	7,5	4,0	8,7

Tabla 6.3. Clasificación completa promedio de artículos por años en revistas de corte práctico (CEP, IEEE CST, JPC).



Figura 6.3. Clasificación completa promedio de artículos por años en revistas de corte práctico (CEP, IEEE CST, JPC).

mantiene en niveles similares en los últimos años, sí se vislumbra una suave caída en el de Métodos de Diseño, en tanto que el denominado Otros Campos experimenta un ligero aumento, como también era de esperar por la aparición de técnicas de control que dan

respuesta a nuevos retos y campos de aplicación englobados en esa categoría. El resto de los campos se mantiene con una representatividad más o menos constante e inferior al 10%. El campo menos representativo es el de Sistemas Sociales, que en 2007 tuvo un repunte debido a la publicación de números especiales sobre esta temática. El campo de Sistemas de Transporte y Vehículos es bastante representativo y con interés creciente en los últimos años, con fluctuaciones que coinciden también con la publicación de números especiales a veces producto de la celebración de congresos sobre esa temática. En el caso de los Sistemas de Potencia y Procesos también existen fluctuaciones con una representatividad durante los últimos años en torno al 4%. El campo de Computadores, Cognición y Comunicación ha mantenido una presencia relativamente constante en torno al 6%.

En el caso de revistas orientadas a las aplicaciones prácticas, la variabilidad es mucho mayor. La tendencia seguida por el campo de Métodos de Diseño es similar a la de las revistas de corte teórico, siendo uno de los campos importantes pero cuyo interés va decreciendo en los últimos años. El campo de Señales y Sistemas también es relevante, pero aparece destacado el de Sistemas de Potencia y Proceso, donde el número de aplicaciones publicadas es muy relevante con oscilaciones en varios años que responden a la aparición de números especiales sobre esta temática en las revistas consideradas. Por orden de importancia le siguen el campo de Sistemas de Transporte y Vehículos, cuyo interés va creciendo en los últimos años, como es también el caso de las categorías de Otros Campos, Aplicaciones de Control y Sistemas Biológicos y Ecológicos. El campo que menos aplicaciones tiene es el de Sistemas Sociales. Los campos de Manufactura y Sistemas Logísticos y el de Mecatrónica, Robótica y Componentes suelen tener una presencia representativa intermedia entre el 5 y el 15% durante los últimos años. El campo de Computadores, Cognición y Comunicación se ha mantenido constante y con una representatividad en torno al 5% en el horizonte temporal considerado en este estudio. Las figuras 3 a 13 del Anexo Web 2 muestran los promedios de las revistas teóricas y prácticas consideradas a lo largo de los años, en cada uno de los campos principales de la clasificación de IFAC, junto a una interpretación de los datos.

6.1.3. Líneas de investigación en control de universidades del índice ARWU

Se presenta a continuación una síntesis de la actividad investigadora que en el campo del control automático se viene desarrollando en algunas de las mejores universidades del mundo. Los resultados que se muestran corresponden fundamentalmente a grupos de investigación o departamentos cuya actividad primera es el campo de la automática y, más concretamente, el control. Las universidades analizadas se muestran en las tablas recogidas en el anexo D junto con su clasificación según el ranking ARWU de 2007. Para el análisis que se ha efectuado se ha tomado la clasificación correspondiente a Inge-

niería/Tecnología y Ciencias de la Computación. El total de Universidades analizadas es de 31, de las cuales 16 son americanas, 10 son europeas y 5 asiáticas. Hay que señalar que de las 10 primeras universidades del mundo 8 poseen grupos de investigación en control automático, así como al menos 20 de las 30 primeras. Como ya se ha señalado, el estudio se ha centrado en los campos de la clasificación de IFAC.

Para extraer los datos que se muestran se ha utilizado la información que sobre docencia e investigación proporcionan los centros, departamentos o grupos de investigación en sus páginas web sobre su propia actividad principal. Ciertamente, los datos puede que no sean completos y hacen referencia a los aspectos que los propios investigadores consideran más relevantes, por lo que el análisis sólo tiene un carácter indicativo de cómo se ven los propios grupos analizados. No obstante, el análisis en conjunto permitirá obtener una idea, siquiera aproximada, de la investigación actual en las mejores universidades. No se han analizado centros de investigación no ligados a departamentos universitarios, lo que para algunos países puede restar datos significativos. En cualquier caso, la información que se presenta no deja de ser una muestra de las tendencias actuales de investigación en el control. Se puede encontrar información más detallada en el Anexo Web 3.

La figura 6.4 muestra la distribución porcentual de la investigación que las universidades analizadas realizan en los campos de la clasificación de la IFAC. En la gráfica se ha incluido un campo adicional en el que se han incluido el control de sistemas cuánticos y moleculares. Como se puede observar la gran mayoría de las universidades realizan investigación en alguna de las materias del campo Sistemas y Señales y de las materias del campo de Métodos de Diseño. Una dedicación sensiblemente inferior tiene el campo de Computadores, Cognición y Comunicación. Los campos de aplicación tienen una distribución bastante similar en los rangos del 50% al 66% salvo el campo de los sistemas sociales y el más nuevo de control de procesos cuánticos y moleculares con valores sensiblemente menores.

Los grupos no señalan el tema de Educación en Control en sus líneas de investigación. Sin embargo hay bastantes que lo tienen como parte de su actividad. Hay que destacar que en la mayoría de los centros el control aparece como un grupo de investigación dentro de una estructura académica más amplia como departamento o centro de investigación. En la mayoría de los centros de investigación los grupos de control colaboran con otras áreas en investigaciones multidisciplinares, generalmente dentro de la ingeniería eléctrica y electrónica y también con las ciencias de la computación, o la ingeniería aeronáutica y del espacio, y la ingeniería mecánica.

Se detecta una proliferación de grupos de investigación multidisciplinares en los campos de la biología, la química y la física a nivel de meso-escala y nano-escala. En muchas de las universidades personas del campo del control colaboran en estas investi-

gaciones; destacan el esfuerzo norteamericano en torno a las universidades MIT, CAL-TECH y UCSB con la creación del Institute for Collaborative Biotechnologies, también, la Universidad de Berkeley, y la de Zurich a menor escala; la Universidad de Kioto con la creación del iCeMS para el estudio de sistemas en la meso-escala, y la Universidad de Toronto con el Center for Quantum Information and Quantum Control. El control cuántico también se encuentra en centros como Harvard y el MIT. En Europa no aparecen estos campos, por lo que es de suponer que se está realizando o bien por grupos no necesariamente de control, o bien por grupos en universidades no analizadas.

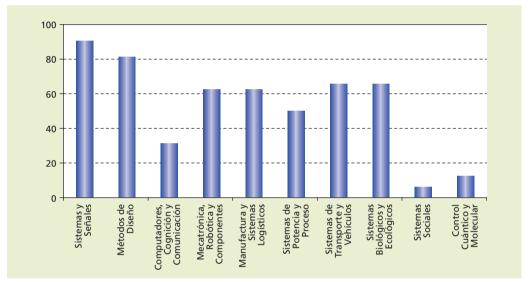


Figura 6.4. Porcentaje de los campos de la IFAC que son objeto de investigación en relación al número de universidades analizadas.

Distribución de las materias en las universidades analizadas

La figura 6.5 muestra la distribución de las materias en términos proporcionales al número de universidades analizadas. Algunas materias no aparecen al no haberse detectado ningún centro con investigación relevante en el tema.

Como se puede ver las técnicas de diseño con mayor presencia son las de Control Óptimo y Sistemas No Lineales con una presencia en torno al 70 % de las universidades. Le siguen, con una presencia en alrededor del 60% de las universidades, los temas de Sistemas en Red, y los Sistemas Discretos e Híbridos. En tercer lugar con una presencia de alrededor del 50% de los centros están los temas de Sistemas Adaptativos y de Aprendizaje, y los de Modelado, Identificación y Procesamiento de Señales. Una presencia algo menor la tienen los temas de Control Robusto, en torno al 44%, y los temas de Control Estocástico, con un 38%.

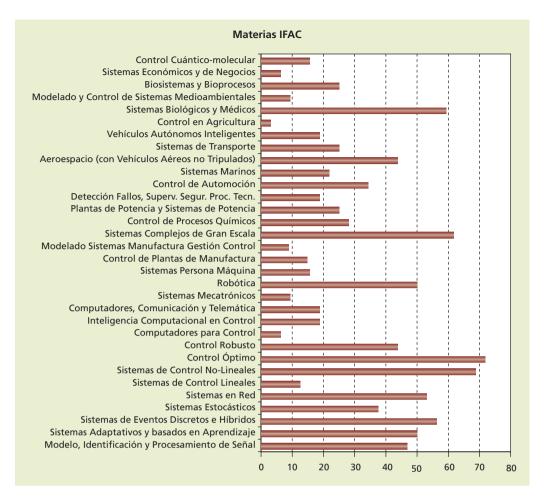


Figura 6.5. Distribución porcentual de las materias de la clasificación de la IFAC en las universidades analizadas.

Desde el punto de vista de las aplicaciones las que muestran una mayor presencia, en torno al 60%, son las de los Sistemas de Gran Escala y las aplicaciones Médicas y Biológicas. Le siguen los temas de Robótica con una presencia en el 50 % de las universidades. Tienen también una presencia importante los temas de Aerospacio, incluyendo los vehículos aéreos no tripulados (44 %) y los de Control de Automoción (34 %). En el entorno del 25% se sitúan los temas de Control de Procesos Químicos, Plantas de Potencia y Sistemas de Potencia, Sistemas de Transporte y los temas de Biosistemas y Bioprocesos. Con un valor muy próximo, en torno al 20%, se sitúan los temas de Sistemas Marinos, Sistemas Autónomos Inteligentes y los de Detección de Fallos, Supervisión y Seguridad de de Procesos Tecnológicos.

6.2. En el contexto español

En España existen numerosos grupos que investigan en el campo del control automático. Estos grupos provienen de diferentes ámbitos, principalmente de departamentos de universidades, de institutos del Centro Superior de Investigaciones Científicas, y de centros tecnológicos. La diversidad de los grupos de investigación existentes da una idea del carácter multidisciplinar del control automático, en el que existen investigadores dedicados a la automática, al control inteligente, al modelado y simulación de procesos dinámicos, etc.

Cabe destacar la aglutinación de grupos de investigación que se ha realizado desde el Comité Español de la Automática (CEA), que se estructura en ocho grupos temáticos de los cuales cuatro están relacionados directamente con el control automático: Ingeniería de Control, Control Inteligente, Sistemas de Tiempo Real y Modelado y Simulación de Sistemas Dinámicos.

En el Anexo C se enumeran los grupos de investigación de control automático en España (en 2009). Se puede observar en ella la diversa procedencia de los miembros y su amplia distribución geográfica, llegando el número de grupos hasta 75, todos ellos con una contrastada actividad investigadora en el campo del control. Hay un alto número de investigadores actualmente adscritos a los distintos grupos mencionados: se estima que más de 700, de los cuales la mayoría son doctores. Como vehículo de comunicación e intercambio se cuenta, entre otros recursos, con la página web de CEA http://www.ceutomatica.es.

El control automático se entiende en un amplio sentido que comprende distintos campos de investigación y su aplicación a nivel industrial, en biomedicina, sistemas logísticos, alimentación, vehículos autónomos, etc., así como todos los problemas que lleva aparejado la implementación de estos sistemas de control en la vida real: control en tiempo real, comunicaciones industriales, etc., entre los cuales se pueden citar:

- Control avanzado (control robusto, adaptativo, predictivo, inteligente, en tiempo real, control híbrido, control no lineal, control óptimo, etc.).
- Modelado y simulación de procesos industriales.
- Sistemas de control basados en red, redes de comunicaciones, transmisión de datos, etc.
- Síntesis y diseño integrado.
- Modelado, simulación y optimización de sistemas logísticos.
- Optimización para control.
- Sistemas de eventos discretos.
- Sistemas empotrados, distribuidos y de tiempo real.

- Supervisión, mantenimiento predictivo, detección y diagnosis de fallos, y sistemas de control tolerantes a fallos.
- Instrumentación.
- Informática Industrial.
- Inteligencia artificial aplicada al modelado, identificación y control de procesos.
- Laboratorios virtuales, remotos, innovación tecnológica-educativa, enseñanza de la automática a través de Internet.
- Técnicas de control aplicadas a procesos industriales, biotecnológicos, agrícolas, energías renovables, biomedicina, alimentación, biología de sistemas, vehículos autónomos, espaciales, marinos, etc.

Como se ha comentado anteriormente, la comunidad científica del control automático, se agrupa en una serie de sociedades científicas de ámbito internacional ya enunciadas. Las más importantes son: IFAC (Internacional Federation of Automatic Control), IEEE- CSS (Institute of Electronics and Electrical Engineering – Control System Society), la EUCA (European Union Control Association) y la ISA (Internacional Society of Automation) aunque esta última es una asociación profesional más que científica. A continuación se va a comentar la presencia española en la dirección de estas asociaciones.

En el ámbito directivo de IFAC (Consejo, asesores, comité técnico y el comité ejecutivo) en el año 2008 había 55 personas de las que 3 eran españoles, lo que representa un 5,45% del total. En este marco directivo están representados 25 países, la mayoría con 1 ó 2 representantes, excepto EEUU que tiene 6 (con un 11%). Cabe destacar que el presidente IFAC y por tanto el representante a nivel mundial de esta asociación durante los años 1999-2002 fue español: el profesor Pedro Albertos, de la Universidad Politécnica de Valencia.

En el momento actual no hay ningún español dentro del comité ejecutivo de la Control Systems Society del IEEE pero sí dentro del board of governors, en el que solo hay 9 países representados con un miembro cada uno excepto EEUU que tiene 11 representantes.

En cuanto a la participación en EUCA cabe destacar que el presidente de esta asociación durante los años 2005-2007 fue español: el profesor Eduardo Fernández Camacho, de la Universidad de Sevilla.

Dentro de ISA está la sección española (http://www.isa-spain.org/index.asp) que aglutina a todos los miembros españoles asociados a ella. Cuenta con 435 miembros, 4 secciones de estudiantes activas y está patrocinada por la mayoría de las empresas relacionadas con la automática en España (48 empresas), como ABB, Honeywell, Schneider Electric, CEPSA, Siemens, Omron, etc.

6.2.1. Publicaciones internacionales

En este apartado se presenta un estudio sobre la presencia de investigadores españoles, en relación con otros países, en los comités técnicos y/o editoriales de las revistas de la categoría Automatización y Sistemas de Control registradas en el *Institute for Scientific Information* (ISI, http://www.isiwebofknowledge.com) que tienen índice de impacto en diciembre de 2008, y que aparecen en el Anexo E. Se considera la presencia de los investigadores como autores de artículos, editores, editores asociados, etc., ya que en las revistas pueden tener diferentes denominaciones para estos cargos.

La Tabla 6.4 muestra la composición de los comités editoriales de las diferentes revistas internacionales de control automático atendiendo a las distintas nacionalidades, incluida la española (diciembre 2008). No se han considerado todas las revistas listadas en el Anexo E sino sólo las más representativas. Como se puede observar hay varias revistas con presencia española, destacando dos de ellas, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* y *Control Engineering Practice*, con tres miembros españoles en el comité. Esto representa un 6,81% para la primera revista y un 3,66% en la segunda. De las 21 revistas consideradas, hay presencia española en más de la mitad (12). Esta presencia puede parecer no muy elevada, pero está acorde con nuestro peso en la economía mundial, aunque habría que hacer un esfuerzo importante por aumentar estos números.

Revista	USA	Canadá	China	Japón	UK	Francia	Italia	Alemania	España	Resto	Total
5	28	3	4	7	4	4	8	1	1	29	89
7	13	2	1	0	2	3	3	1	3	16	44
12	13	8	4	2	10	7	3	4	3	28	82
14	7	3	3	2	6	3	2	5	1	19	51
16	2	0	0	2	2	3	6	3	1	12	31
17	3	1	1	0	3	4	5	1	0	10	28
18	12	0	0	0	0	0	0	1	1	1	15
19	1	0	0	1	0	0	3	0	0	3	8
20	24	1	4	1	1	1	4	0	1	18	55
21	19	2	3	4	2	6	8	0	0	8	52
22	28	3	0	0	2	1	7	4	0	9	54
25	20	6	10	5	10	1	1	5	1	16	75
28	11	1	0	1	11	4	2	0	0	10	40
30	3	0	1	1	7	2	3	2	0	9	28
34	20	1	2	1	8	1	5	1	1	11	51
39	27	0	0	0	0	0	0	0	0	2	29
42	7	1	1	1	1	0	2	4	0	9	26
46	4	1	0	0	4	0	4	2	0	9	24
47	12	2	0	0	7	0	0	2	1	3	27
50	18	0	3	0	1	3	2	2	2	7	38
51	22	1	1	2	1	5	5	3	1	16	57

Tabla 6.4. Distribución por países de representantes en los comités editoriales de las revistas internacionales de Automatización y Sistemas de Control (Diciembre 2008).

La Tabla 6.5 muestra el número de artículos publicados por autores de diferentes nacionalidades, incluida la española, en las revistas listadas en el Anexo E. La información ha sido obtenida del ISI (2008), y abarca todos los artículos de los años en los que esas revistas han estado indexadas. Se ha tenido en cuenta el número total de artículos publicados en esas revistas (columna «Total»), pero en los distintos artículos se han considerado el número de autores de cada país, por lo que en general no coincidirá la suma de todas las celdas de cada fila con el total. Como se observa existe presencia española en todas las revistas, pero donde ésta es más significativa es en: Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems (número 7) con 98 artículos, que representa un 7,18%; Control Engineering Practice (número 12) con 61 artículos, es decir un 4,15%; Engineering Applications of Artificial Intelligence (número 14) con 70 artículos y por tanto un 6,57%; e IEEE Robotics and Automation Magazine con un 7,65%.

Revista	USA	Canadá	China	Japón	UK	Francia	Italia	Alemania	España	Resto	Total
5	1188	245	293	158	301	275	284	91	51	1650	3978
7	280	48	94	25	112	76	68	41	98	775	1364
12	190	59	46	101	240	163	109	115	61	785	1471
14	226	83	90	31	144	45	31	44	70	512	1066
16	36	7	17	10	24	57	38	23	10	126	274
17	93	48	131	41	268	27	41	23	27	517	1025
18	299	23	10	22	43	17	17	26	11	122	549
19	168	13	6	17	14	15	30	23	26	104	340
20	109	5	39	6	13	8	7	6	3	59	193
21	2517	328	422	226	276	400	347	114	37	1849	5670
22	556	93	52	48	85	69	74	38	19	587	1206
25	368	111	242	77	109	33	51	34	43	680	1428
28	166	49	41	16	79	63	47	16	18	276	625
30	1616	325	258	500	1208	243	202	96	41	2443	7049
34	382	34	70	56	80	82	77	26	21	397	945
39	1496	193	52	111	130	39	63	28	11	554	2407
42	177	99	38	16	65	31	22	37	22	336	694
46	176	50	56	48	143	15	29	25	16	479	927
47	205	69	22	16	63	21	7	30	5	230	600
50	1134	181	141	98	198	419	237	148	60	918	2667
51	928	144	172	143	209	251	277	161	26	921	2922

Tabla 6.5. Distribución por países de artículos publicados en las revistas internacionales de Automatización y Control de Sistemas.

Si se estudian las publicaciones de autores españoles en las distintas revistas consideradas se puede comprobar cómo se ha incrementado el número en los últimos años. Por ejemplo, en la revista Control Engineering Practice en 1995 sólo hubo un artículo publicado por autores españoles de los 123 artículos publicados (0,81%), mientras que en el año 2005 hubo 4 artículos de 97 (4,12%) y en 2008 el número de artículos publicados es de 8 sobre 112 (7,14%). Además estos números son comparables a los de autores de los países

europeos cercanos a España. Por ejemplo en 2008 Francia publicó en la misma revista 15 artículos, Gran Bretaña 15, Italia 9, y Alemania 4. En la figura 6.6, se recogen los artículos publicados por autores de distintos países en las revistas consideradas en la Tabla 6.5 en distintos años: 1995, 2000, 2005 y 2008. Como puede verse en España hay un aumento considerable de publicaciones desde el año 1995 hasta el 2008, y se puede comparar en número a las de, por ejemplo, Japón o Alemania.

Si se realiza un estudio de artículos publicados por autores españoles en los últimos años se tiene que en 2004 se publicaron 44 artículos en total en la suma de todas las revistas consideradas en la Tabla 6.5; en 2005 fueron 55 artículos; 75 en 2006; 62 en 2007 y finalmente 93 artículos en 2008, de forma que queda clara la progresión en publicaciones de los autores españoles.

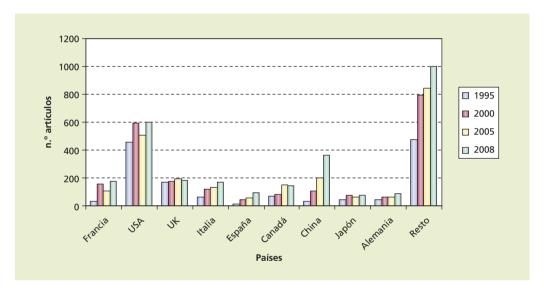


Figura 6.6. Relación de los artículos publicados por autores de distintos países en las revistas consideradas en la Tabla 6.5, durante los años 1995, 2000, 2005, 2008.

Se puede hacer este mismo estudio en dos periodos de 5 años consecutivos (1999-2003 y 2004-2008), en lugar de para cuatro años concretos, y ver la evolución de los artículos publicados, como se muestra en la figura 6.7, donde se observa la misma tendencia.

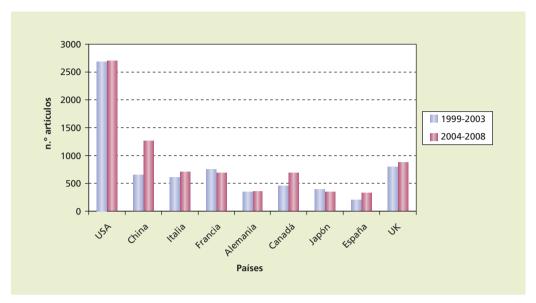


Figura 6.7. Relación de los artículos publicados por autores de distintos países en las revistas consideradas en el Anexo E, durante los periodos 1999-2003 y 2004-2008.

6.2.2. Congresos internacionales

En este apartado se analiza la participación de investigadores españoles en la organización de congresos sobre control automático, a través de representaciones en los comités internacionales de programa (IPC). La Tabla 6.6 muestra el número de investigadores españoles que forman parte del IPC de ediciones recientes de varios congresos destacables sobre control automático, en comparación con el total de miembros de comité. Dado el elevado número de congresos en el área de ingeniería de control se han seleccionado los más característicos, así como una representación de algunas de las temáticas del área. El significado de las siglas es el siguiente: ECC: European Control Conference, CDC (IEEE Conference on Decision and Control), CCA: (Conference on Control Applications), SAFEPROCESS (Symposium on Fault Detection, Supervision, and Safety for Technical Processes), ADCHEM (International Symposium on Advanced Control of Chemical Process), SYSID (Symposium on System Identification).

Destaca la importante presencia española en los últimos años en uno de los congresos más importantes de esta área: *IFAC World Congress*, especialmente en los años 2002 y 2005 que se realizaron en Europa (España y República Checa, respectivamente), aunque el número disminuye cuando se realizan en otros continentes, así como en el congreso CCA donde hay presencia española todos los años. Se debería potenciar más la participación española en los comités de los congresos internacionales.

Congreso	Edición	Españoles	Total	%Españoles	Comité
Mundial de IFAC	1999	2	21	9,52	International Program Committee
Mundial de IFAC	2002	11	26	42,3	International Program Committee
Mundial de IFAC	2005	5	29	17,44	International Program Committee
Mundial de IFAC	2008	3	91	3,29	International Program Committee
ECC	2001	4	86	4,65	International Program Committee
ECC	2003	4	99	4,04%	International Program Committee
ECC-CDC	2005	13 (16)	34(171)	38,23 (9,35)	Committees
ECC	2007	1	51	1,96	International Program Committee
CDC	2004	0	44	0	Technical Program Committee
CDC	2006	0	31	0	Technical Program Committee
CDC	2007	0	41	0	
CDC	2008	2	81	2,46	Technical Program Committee
CCA	2005	0	30	0	Technical Program Committee
CCA	2006	3	38	7,89	International Program Committee
CCA	2008	3	50	6	Technical Program Committee
CCA	2009	3	46	6,52	International Program Committee
SAFEPROCESS	2000	2	45	4,44	International Program Committee
SAFEPROCESS	2003	1	34	2,94	International Program Committee
SAFEPROCESS	2006	1	63	1,59	International Program Committee
SAFEPROCESS	2009	0	31	0	International Program Committee
ADCHEM	2003	0	64	0	International Program Committee
ADCHEM	2006	0	70	0	International Program Committee
ADCHEM	2009	1	76	1,31	International Program Committee
SYSID	2003	1	54	1,85	International Program Committee
SYSID	2006	0	49	0	International Program Committee
SYSID	2009	0	56	0	International Program Committee

Tabla 6.6. Distribución de los miembros de comités de algunos congresos internacionales en el área de Control Automático.

También se ha analizado la participación española mediante ponencias en congresos internacionales, teniendo en cuenta las actas de congresos registrados en el ISI, así como algunas de las páginas web o actas de congresos donde existía una división de los artículos presentados por países (Tabla 6.7). Se debe notar que los únicos congresos registrados de momento en el ISI son los de IEEE. Como puede apreciarse nuevamente, el aumento de artículos de autores españoles es espectacular, especialmente si se considera, por ejemplo, el congreso más importante en el área de la Ingeniería de Control: Congreso Mundial de IFAC. En 1999 se celebró en Beijing (China) con sólo 39 artículos publicados por autores españoles de 1556 (un 2,5%); en el año 2002 el aumento de artículos fue llamativo, hasta 161 de 1700 (un 9,5%) probablemente favorecido porque se celebró en Barcelona, España. Pero el incremento continuó al congreso siguiente en 2005 en Praga, donde se llegaron a 255 artículos publicados (10,4%). Finalmente el último congreso celebrado en 2008 se celebró en un país asiático, Corea del Sur, y en este caso el número de artículos fue menor que en el año anterior (4,3%), pero se ha consolidado el aumento de artículos publicados por españoles. Esta misma tendencia se puede apreciar en otros

congresos del área también muy importantes, como en el CDC donde se han pasado de 9 artículos en 2004 a 19 en 2007, o en el ECC que se han pasado de 42 artículos en 2001 (congreso celebrado en Portugal), a 62 en la edición de 2007.

Congreso	Edición	Total	UK	España	Francia	Italia	Alemania	Japón	USA	China	Resto
Mundial de IFAC	1999	1556	112	39	108	50	93	154	213	393	600
Mundial de IFAC	2002	1700	161	161	193	114	117	124	255	121	907
Mundial de IFAC	2005	2456	278	255	521	414	310	378	449	278	2379
Mundial de IFAC	2008	2700	149	118	303	137	179	242	261	335	1576
ECC	2001	689	75	42	128	91	64	22	39	7	374
ECC	2003	650	86	37	101	57	58	29	39	24	288
ECC-CDC	2005	1420	58	55	154	132	54	63	384	36	460
ECC	2007	834	62	62	120	89	37	37	100	10	317
CDC	2004	929	31	9	35	91	16	47	380	38	266
CDC	2006	1131	53	9	75	99	26	61	413	40	349
CDC	2007	1053	33	19	61	87	21	62	386	74	288
CAC	2005	288	10	2	19	4	11	23	39	15	157
CAC	2006	360	12	16	46	22	58	55	28	6	133
CAC	2007	270	8	7	14	5	7	35	33	40	113

Tabla 6.7. Distribución por países de artículos en algunos congresos internacionales de Ingeniería de Control.

También ha aumentado considerablemente el número de congresos internacionales celebrados y organizados en España en el área del control automático. Como dato relevante se puede indicar la mayor presencia del Comité Español de Automática que ha avalado numerosos congresos y simposios internacionales. Es de destacar por su importancia y relevancia mundial la celebración de dos congresos singulares: por un lado el XV congreso mundial de IFAC celebrado en Barcelona en 2002, con un total de 1700 artículos presentados. La participación fue en torno a 2000 participantes. El segundo de los congresos destacable fue la conferencia conjunta entre la 44th IEEE Conference on Decisión and Control y la European Control Conference 2005 (CDC-ECC'05) celebrada en Sevilla en diciembre de 2005, con un total de 1470 artículos presentados.

6.3. Relación entre el mundo académico y la industria

Este apartado trata de reflejar algunas ideas sobre la relación, a nivel de I+D+i, del sector académico del control automático con la industria en el contexto nacional.

La evolución tanto de la industria como de otros campos (bioingeniería, comunicaciones, microsistemas, cadenas de distribución, etc.) sigue un ritmo acelerado donde la innovación y el funcionamiento eficaz juegan un papel destacado para afrontar la competencia, las exigencias de calidad, el respeto al medio ambiente y la disminución de costos.

Esta evolución se desenvuelve a escala global, de modo que las barreras nacionales van dejando paso a una realidad de mercados y decisiones cada vez más internacionalizados. En este marco, y con las condiciones y tamaño de nuestro país, en el que la tradición de investigación en la empresa es limitada, así como los recursos que a ello se destinan, la colaboración entre las entidades públicas, los centros de investigación y formación y las empresas aparece como una exigencia inexcusable para ayudar a afrontar los retos de la innovación y la globalización. Y ello es cierto tanto para las ramas industriales consolidadas que deben innovar y ganar en eficacia como para los sectores emergentes más próximos a la economía del conocimiento que se quiere impulsar desde muchas instancias. Pocas veces se pone esta idea en cuestión, y, si miramos con la perspectiva de unos cuantos años, los esfuerzos de muchas personas desde ambos lados han permitido dar un gran paso desde una situación de mundos separados a otra en la que la mayoría de los departamentos y grupos de investigación (aunque probablemente no de los profesores) tienen algún tipo de relación con la industria, aunque todavía quede mucho camino por recorrer.

Ahora bien, esta colaboración para la innovación, para ser fructífera, debe ser flexible y consciente de la complejidad y de las dificultades que entraña. Más allá de los estereotipos de la Universidad o Instituto que investiga por su lado y luego transfiere su conocimiento a la industria que aplica los inventos, la realidad, refiriéndonos a estos, es que:

- Para innovar y ser creativos en un sector los grupos de investigación tienen que conocer a fondo ese sector
- Para innovar y ser creativos en un ámbito internacional se requiere nivel internacional en los grupos de investigación.
- Los procesos son largos y demandan recursos, a veces sin resultados inmediatos.
- Los incentivos a la colaboración industrial son limitados.
- Las formas de colaboración son múltiples y su eficacia depende de diversos factores.

El primer punto se traduce en la necesidad de establecer relaciones y contactos estables y a largo plazo con los sectores industriales implicados. Esto permite conocer los problemas, necesidades y puntos de vista de las partes como base sobre la que edificar cualquier desarrollo futuro. Por otro lado, en un área horizontal como es el control automático, el primer punto implica también la necesidad de especialización de los grupos en determinados sectores, lo que debe abarcar igualmente la especialización de la enseñanza de los nuevos másteres. La necesidad de titulados bien formados en un campo, y de equipos familiarizados con el mismo, es un requisito previo para cualquier proyecto de colaboración y ello exige que las Universidades que quieran andar por este camino ofrezcan programas de máster orientados a campos específicos y de contenidos suficientes.

El segundo punto implica una apuesta por la calidad, tanto en la enseñanza como en la investigación como requisito para una relación exitosa en la cooperación industrial. Frente a las idea más o menos admitidas en muchos ámbitos académicos de que las aplicaciones industriales van por detrás de la teoría, la realidad es que resolver problemas industriales nuevos o innovar en productos o procesos, cuando se considera un ámbito internacional, no es nada fácil y, a menudo plantea problemas que requieren de nuevos planteamientos teóricos o enfoques, los cuales exigen una sólida formación de base para su resolución.

Por otra parte, la realidad de la colaboración industrial muy a menudo mezcla la necesidad de resolver problemas nuevos con la exigencia de las empresas de obtener resultados tangibles o implementaciones a veces a plazo fijo, los cuales son frecuentemente requisitos poco compatibles. Pero la investigación requiere explorar aspectos que a primera vista pueden parecer poco relevantes para el problema concreto considerado y el investigador necesita también situar su trabajo en el marco de lo que se valora académicamente. Entender esto y darle soluciones adecuadas está en el centro del problema de la cooperación. Si no hay un marco razonable para el trabajo científico o no hay un reconocimiento académico de la actividad de cooperación industrial, muchos investigadores no encontrarán incentivos suficientes para embarcarse en actividades que consumen tiempo y pueden no estar reconocidas adecuadamente. Las recetas dependen de cada circunstancia concreta pero hay una serie de factores que pueden ayudar a enfocar y plantear la cooperación en un marco adecuado:

- El trabajo en equipos con perfiles multidisciplinares, o con socios participantes de empresas de ingeniería o comercialización, que permiten a los grupos de investigación concentrarse en la esencia de los problemas y en sus aspectos más científicotécnicos, liberándoles de otras tareas de implementación, prueba, etc. que son necesarias en un proyecto y pueden consumir una gran parte del tiempo y recursos sin que produzcan resultados directamente valorados en los ámbitos académicos.
- La combinación de recursos de las empresas con ayudas públicas que permiten una cierta independencia en la selección de objetivos, métodos, etc. y el desarrollo paralelo de distintas facetas de una investigación.
- La formalización de estructuras de cooperación empresa-investigadores con una cierta estabilidad donde se pueda trabajar con horizontes más allá de una ejecución concreta.
- Una mejora en la valoración por parte de los organismos de evaluación académica del esfuerzo y tiempo adicionales que implica la realización de proyectos de cooperación industrial.

Hoy día la legislación y las ayudas públicas a la investigación contemplan fórmulas que permiten enmarcar adecuadamente la cooperación entre centros de investigación y empresas a sus distintos niveles. Convocatorias como los proyectos CENIT (Consorcios

Estratégicos Nacionales en Investigación Técnica) o TRACE, los Campus de Excelencia Internacional, las Plataformas Tecnológicas, los Institutos Mixtos en las Universidades, las ayudas a Centros tecnológicos, etc. proporcionan un entramado razonable de fórmulas y ayudas públicas. Quizás uno de los obstáculos principales en este sentido se encuentra en el desconocimiento de muchas de las fórmulas, particularmente en el caso de las empresas, así como en el tiempo y esfuerzo que requiere su puesta en marcha. Un elemento añadido para el caso particular de las actuaciones relacionadas con la automatización en sentido amplio es que, en algunos programas, la exigencia de cantidades presupuestarias mínimas de bastantes millones de euros en los proyectos, deja fuera de juego a muchas posibles iniciativas al no ser necesarios equipos muy costosos, sino más bien personal y equipos informáticos. Entendemos que debería reconsiderarse este punto adaptando las convocatorias a las particularidades de los distintos campos científico-técnicos.

Por otra parte es importante resaltar que se necesitan todos los niveles de colaboración y que probablemente para tener un grupo excelente en su actividad industrial se requiera la existencia de otros muchos en diferentes grados de relación, actividad, experiencia y evolución y que debe facilitarse tanto la entrada al sistema con un contrato Art. 83, como incentivarse especialmente lo que se orienta a la cooperación en investigación, particularmente con estructuras estables.

Éstas, como se ha comentado, revisten diversas formas. Hay grupos que mantienen relaciones basadas en la participación en proyectos de cierta envergadura. De estos, hay convocatorias que, como los CENIT o los proyectos singulares y estratégicos, proporcionan recursos y un entramado de actores que cubre las actividades relevantes de un sector, y constituyen una línea de colaboración especialmente interesante, particularmente desde el punto de vista del carácter horizontal del control automático como disciplina que está presente en muchos dominios. Otros grupos están ligados a Centros Tecnológicos donde se desarrolla una actividad muy dirigida a las necesidades industriales, combinando fondos públicos y contratos de empresas. Otros mantienen Centros Mixtos con un sector industrial en que una Universidad facilita locales y servicios básicos y las empresas aportan financiación y experiencia, decidiéndose de común acuerdo la investigación en problemas básicos del sector. Otra experiencia interesante se da a través de las Plataformas Tecnológicas, con la mirada puesta en influir en la administración y en cooperar cara a proyectos europeos. Pero en la mayoría de los casos la relación es más bien puntual, al estilo de los EPOS de los proyectos del Plan Nacional de I+D+i o como contratos Art. 83.

El tema del reconocimiento académico de la cooperación industrial no es sencillo. Desde otras áreas de conocimiento no-técnicas se argumenta a veces que vía contratos Art.83 ya se recibe una compensación y ese puede ser el punto de vista de otros sectores. Esto puede ser cierto para ciertos tipos de cooperación, los que están centrados en cola-

boraciones más profesionales y menos de innovación e investigación, pero no desde luego para estas últimas. Si se quiere incrementar sustancialmente la cooperación industriacentros de investigación no se puede eludir el problema. El esfuerzo, responsabilidad y tiempo de la investigación ligada a la industria es muy superior al que se invierte desarrollando actividades en simulación sin que se contabilice adecuadamente en los sistemas de evaluación académicos. El problema está ligado también en parte a la forma de distinguir y medir las actividades de cooperación, pero esa dificultad es un problema común a toda forma de evaluar la actividad investigadora, donde todos los patrones tienen sus defectos.

Un problema que se presenta a menudo en la cooperación industrial en el campo del control tiene que ver con las temáticas que son objeto de atención. Buena parte de la actividad del área está centrada en métodos y algoritmos orientados a mejorar la calidad del comportamiento dinámico de los lazos de control, sin embargo, desde un punto de vista industrial, excepto quizás en algunos procesos o sistemas con una dinámica especialmente difícil, normalmente este es un problema secundario o cuya importancia económica no es relevante. A veces, el problema está más centrado en la dificultad de obtener modelos razonables que en el método específico de control. Sin dejar de valorar la importancia que tiene y debe seguir teniendo el desarrollo de la teoría de control, ocurre que la comunidad científico-académica y la industrial dirigen su atención a temáticas y problemas no siempre coincidentes.

En este sentido, junto al campo del modelado y la identificación y estimación de variables, es importante señalar tres áreas de actividad que deberían recibir más atención y donde esa confluencia sería más fácil:

– España es un país donde buena parte de su industria está participada de capital exterior de modo que fabrica muchos productos pero diseña pocos. El que los grupos de investigación punteros puedan cooperar con los equipos de diseño de estas compañías, normalmente radicados en el exterior, no es una utopía y, de hecho las multinacionales están abiertas a ello. Pero es claro que la mejora de la fabricación, tanto en la industria manufacturera como en la de procesos, aparece también de forma natural como un centro de actividad importante y con una perspectiva social añadida de ayudar a evitar la deslocalización de empresas. Por otra parte, las decisiones que involucran mayor repercusión de funcionamiento y económica se sitúan en la operación global de los procesos más que en el control de sus variables individuales, aunque el funcionamiento de este nivel sea un requisito previo para cualquier otra consideración, según lo que se conoce como la pirámide del control. Ello presupone dar un salto en el enfoque de los problemas desde el nivel del lazo de control a ver una factoría, o una sección de la misma, como un sistema dinámico multivariable donde hay que cumplir unos objetivos para lo cual han de tomarse a lo largo del

tiempo una serie de decisiones, sujetas a una serie de restricciones, de modo similar a lo que hace un lazo de control con su objetivo de alcanzar la referencia. Los objetivos pueden ir desde el mantenimiento de unas variables de calidad o garantizar que ciertas variables están en un cierto rango hasta otros más generales como minimizar el consumo energético o maximizar la producción, pero no son ajenos a las formulaciones típicas de los sistemas de control y los elementos que pueden usarse en una toma de decisiones racional pasan por el modelado de la dinámica (continua ó discreta), el uso de técnicas y conceptos de control y optimización, la consideración de incertidumbres, bien del modelo o del proceso, el problema de la detección de fallos, etc., típicos del control automático, pero considerados con otra perspectiva más económica y globalizadora. Estos son temas que enlazan con el llamado control de planta completa, la optimización en tiempo real (RTO) y el secuenciamiento de la producción, la gestión de cadenas de suministro, etc., campos complejos donde el control automático puede aportar una visión y una metodología que ayuden a la mejora de su gestión, y en los cuales la importancia de las decisiones y la relación beneficio/costo justifica el esfuerzo de la investigación.

- La realidad es siempre diversa y, aunque para poder estudiarla la simplifiquemos y estandaricemos, no ha de olvidarse que, a menudo en la industria y las infraestructuras se plantean problemas no convencionales que son aquellos en los que, cuando se presentan, tiene más sentido la colaboración con equipos de investigadores. La especialización en estos tipos de problemas no-convencionales hace posible y atractiva la colaboración industrial y marca campos que requieren el desarrollo de teoría como pauta para la práctica. Ejemplos de tales problemas pueden ser los sistemas híbridos, en los que parte de las decisiones son continuas y parte discretas, en los que la lógica se mezcla con los modelos tradicionales o en los que el sistema presenta una estructura variable. Otro ejemplo son los sistemas de gran escala, como las redes de distribución de agua, gas, electricidad, etc., donde la toma de decisiones basada en modelos, y las técnicas de distribución de dicha toma de decisiones para hacer factible la consideración de su dimensionalidad, puede mejorar considerablemente su gestión. Igualmente pueden citarse ejemplos en campos como los sistemas de parámetros distribuidos o con grandes retardos.
- El control ha crecido ligado a sectores como la electrónica, la automatización de máquinas y procesos, etc. pero hay campos emergentes destinados a jugar un papel relevante en el futuro, aunque hoy no todos ellos tengan la importancia económica que otros más tradicionales, y respecto a los cuales es una opinión generalmente admitida que no se puede perder el tren si queremos estar en la denominada sociedad del conocimiento. Nos referimos a campos como la biología de sistemas, los microsistemas, la biotecnología y bioingeniería, etc. donde diversas ramas científi-

cas y tecnologías cooperan buscando mejorar el conocimiento de los mismos y el desarrollo de aplicaciones útiles. Precisamente por esta característica de campos emergentes, requieren del apoyo y programas públicos, la cooperación y promoción de empresas privadas y el concurso de equipos de investigadores para salir adelante. En este marco, los enfoques y métodos de la automática, la formalización de modelos dinámicos y métodos de medida y estimación, la teoría de control aportan un enfoque analítico nuevo a otras disciplinas y son un factor importante en el éxito de muchas investigaciones, por lo que la presencia en estos temas debe fomentarse desde todos los ámbitos.

Desde otro punto de vista, la perspectiva de la teoría de sistemas debe estar presente en la educación de los profesionales de otras disciplinas donde confluyen estos campos emergentes, de modo que se facilite la comunicación entre las mismas y un enfoque más abierto de los problemas.

La financiación es un aspecto decisivo de toda acción y una medida indirecta de la actividad. Como se comentó en el capítulo 4, es difícil saber la magnitud de las cantidades que la empresa invierte por si sola en investigación en temas relacionados con el control automático y las cifras de deducciones fiscales no reflejan adecuadamente la situación al no ser a veces admitidas o presentadas. Indirectamente, se puede tener una idea del esfuerzo privado a través de los proyectos que se presentan a las convocatorias públicas de ayudas a la I+D+i pero, respecto a la Administración, ocurre algo parecido. No hay una información agregada de las Comunidades Autónomas, y normalmente las cifras oficiales engloban estos temas en otros epígrafes, en concreto, Diseño y Producción Industrial (DPI) que comprende también otros campos no ligados a la automatización. Del mismo modo, temas de control automático existen también en otros programas como Energía. En 2007, último año del que se dispone de cifras consolidadas, el conjunto de las ayudas públicas en DPI de la Administración Central, incluyendo préstamos sin interés y subvenciones fue de 388 M€, una cifra que va aumentando con los años, lo que demuestra la vitalidad del sector. De esta cifra más de la mitad la gestiona el CDTI, y el 95% se destina a convocatorias de carácter técnico, mientras que los fondos para convocatorias de investigación científica solo alcanzan el 5%. Los solicitantes de ayudas son empresas en el CDTI, con 190 proyectos aprobados, un 75% de empresas en el MCYT (211 proyectos de desarrollo industrial y 69 de investigación industrial) y un porcentaje muy mayoritario de centros de investigación en el ámbito del MEC. En su composición pueden destacarse acciones de equipamiento e infraestructura, fundamentalmente para parques científicos y tecnológicos, que recibieron en 2007, 68 M€ en 42 actuaciones, otro paquete formado por el grueso de los proyectos de desarrollo industrial y finalmente grandes proyectos en los que destacan tres proyectos CENIT por un importe de 38,5M€ (uno solo en 2006) absorbiendo la práctica totalidad de las subvenciones del CDTI. Igualmente, los proyectos y acciones complementarias recibieron 7,4 millones de Euros, $4.2 \, \mathrm{M} \cong$ en subvención y de 3,2 M \cong en forma de créditos, destinándolos principalmente a financiar 18 proyectos de cooperación de investigación técnica $(4.9 \, \mathrm{M} \cong)$, un proyecto singular y estratégico de desarrollo tecnológico $(1.5 \, \mathrm{M} \cong)$, y otro proyecto singular y estratégico de investigación industrial $(0.7 \, \mathrm{M} \cong)$. No se presentó ningún proyecto tractor. En cuanto a los proyectos PETRI de transferencia, solo 6 resultaron aprobados con una asignación total de $0.78 \, \mathrm{M} \cong$. Por la naturaleza amplia de muchos de estos proyectos es difícil atribuir al campo del control automático algún porcentaje concreto de las cifras anteriores, pero, en todo caso, es claro que el número de actuaciones en proyectos industriales significativos puede considerarse bajo, lo que indica una cooperación industrial por debajo de las necesidades del país y las posibilidades del sector, siendo éste un punto estratégico de mejora a considerar.

Respecto a la financiación más específica para investigación no orientada de las Universidades y Centros de Investigación (CSIC y Centros tecnológicos), la Dirección General de Investigación (DGI) viene destinando en torno a 15,5 M€ para unos 140 proyectos de I+D en DPI, con un importe medio de los proyectos del orden de 110.000 € en tres años, con tasas de éxito variables y superiores al 50%. De ellos, más del 80% se realizan en universidades y un 7% en Centros Tecnológicos. No hay hasta el momento ningún proyecto Consolider aprobado. Las convocatorias de investigación científica de la DGI han ido dirigidas a proyectos de investigación pre-competitiva, cubriendo el espectro que va desde la investigación básica a la investigación aplicada sin que existan datos que permitan saber con precisión el balance entre una y otra ni en cuantos proyectos la colaboración centro público-empresa es efectiva a pesar de que un gran número de solicitudes incorporan cartas de apoyo de EPOs.

Respecto a las temáticas contempladas en las actuaciones, en las convocatorias de carácter técnico en 2007 hay un importante número de actuaciones sin clasificar, 256, sobre el total de 535 proyectos aprobados, por la naturaleza amplia del programa DPI. Áreas con un número significativo de proyectos relacionados con el control automático son: sistemas complejos (12), detección y diagnóstico de fallos (11), control avanzado de procesos y sistemas (22), diseño avanzado de procesos y sistemas (38), instrumentación avanzada (10), I+DT componentes, modelos y sistemas (21). Existen también áreas de futuro e importancia con escaso papel como mecatrónica (1) y microsistemas (1). Otras áreas presentan pobres resultados por la baja tasa de propuestas aprobadas, tales como ingeniería de procesos y sistemas de producción (1 de 18), e I+DT de sistemas de gestión y organización de la producción (2 de 17).

En la DGI, las solicitudes aprobadas cubren muchos temas relacionados con el control automático: modelado y simulación (10%), control avanzado y detección de fallos (20%) y gestión y organización industrial (13%), siendo relevante la creciente demanda

de bioingeniería y biomecánica. Por otra parte, vale la pena resaltar la escasa proporción de solicitudes orientadas hacia temas de futuro que como microsistemas, sistemas complejos, mecatrónica, etc. que no llegan en ningún caso al 2% de proyectos aprobados, lo que puede requerir acciones especiales o criterios de incentivación para no perder el tren en estos temas.

En general, la estructura y el presupuesto de las convocatorias ordinarias de la administración, no permiten abordar grandes proyectos de investigación, no obstante, se considera un aspecto positivo la existencia de convocatorias más centradas en grandes proyectos o más focalizadas, como CENIT, la acción estratégica de sistemas complejos o los proyectos estratégicos y singulares.

Respecto a las convocatorias de la DGI, la financiación recibida por los grupos de investigación, mayoritariamente pertenecientes a universidades y al CSIC, a través de las diversas ayudas del Plan Nacional de I+D+i, están contribuyendo a un incremento de su producción científica y a un aumento de su presencia en foros internacionales. Hacer que esta mejora vaya acompañada de una mayor transferencia de resultados hacia los sectores productivos, es un reto de todos, la comunidad de investigadores, la empresa y los organismos públicos.

Propuestas estratégicas para el futuro

La propuesta de líneas estratégicas para el futuro debe basarse en el análisis de las fortalezas del control automático que se han descrito en este libro blanco y en la disponibilidad de medios para su realización.

En primer lugar y como hecho significativo conviene destacar que siendo el control automático una tecnología horizontal no figura, a menudo, de manera explícita en los planes de desarrollo o investigación lo que con una visión un tanto superficial podría llevar a concluir que su importancia estratégica desde el punto de vista económico y social es baja. Pero nada más lejos de la realidad: el número y la complejidad de sistemas que operan de forma automática aumenta de forma continua y cada vez con menos grado de supervisión humana. El control automático, además de permitir operar grandes sistemas, puede optimizar el rendimiento de los mismos y reducir el consumo energético. Por otra parte, el mal funcionamiento de los equipos de control ha ocasionado pérdidas considerables tanto en vidas humanas como en recursos. La complejidad de los sistemas que operan de forma automática como centrales nucleares, sistemas de embalses de agua, estaciones depuradoras, aeronaves, etc. hace que un mal funcionamiento del sistema de control pueda provocar inestabilidades y catástrofes de dimensiones considerables. Se hace necesario, por una parte, el desarrollo de la disciplina para hacer frente a estos nuevos retos y, por otra, el formar especialistas en control que sean capaces de diseñar e implantar sistemas de control con ciertas garantías de seguridad. No se entendería hoy en día que un paciente no fuera operado por un cirujano cualificado por los peligros que los errores pueden provocar en vidas humanas. Los errores en un sistema de control pueden provocar daños mucho más catastróficos.

El programa nacional de Diseño y Producción Industrial (DPI), que es en este momento uno de los principales motores para el desarrollo del control automático, señala en su presentación lo siguiente:

«El objetivo del programa es el desarrollo de conocimientos y avances técnicos o metodológicos que mejoren el diseño y generación de nuevos productos y servicios, procesos y sus medios de producción, en su ciclo de vida completo. Se persigue con ello mejorar la calidad de vida del ciudadano y el nivel de competitividad de la industria nacional, intentando con ello solventar el gran déficit tecnológico existente.

»El concepto de producto comprende aquellos componentes y sistemas destinados a su utilización y comercialización que cumplan una función, ya sea simple o compleja, fabricados en masa o bajo pedido, monomaterial o multimaterial. La producción contempla el ciclo de vida completo, los procesos, componentes y medios de producción para la transformación y montaje de productos, el desensamblado y su recuperación final, incluyendo todos los aspectos relacionados con la organización y su logística.»

Resulta importante señalar que se reconoce un déficit tecnológico existente y que el concepto de producto cubre todo el ciclo de vida. Asimismo es importante recordar que el control automático trabaja con sistemas, independientemente de su carácter físico, ya que su metodología es en un alto porcentaje trasplantable entre diferentes campos de aplicación («independencia del dominio»). El control automático es en cierta forma know how más que fuerza productiva o servicios y es aquí donde se puede encontrar una importante ventaja competitiva.

En este capítulo, sin ánimo de ser exhaustivo se pretende recoger ciertas propuestas de carácter estratégico en relación con el control automático. En primer lugar se analizan los campos estratégicos donde es deseable un mayor desarrollo del control automático. A continuación se exponen las demandas del sector industrial en relación con el control automático. En el siguiente apartado se estudian los temas de formación y de las competencias de un ingeniero especialista en control automático. Por último, se exponen recomendaciones estratégicas sobre la I+D+i en control automático.

7.1. Campos estratégicos del control automático

Como se ha puesto de manifiesto a lo largo de este libro blanco, el objetivo del control automático en el futuro es el desarrollo de la tecnología de control necesaria para hacer que los procesos operen de una forma eficiente, segura y autónoma. La aparición en el mercado de sensores inalámbricos de bajo coste que pueden comunicarse entre sí y que pueden ser desplegados de forma masiva y el aumento de la capacidad de cómputo hace pensar que se podrá resolver el control de sistemas de una complejidad tal que hasta hace poco se consideraban inabordables. Se considera que esta tendencia va a continuar en el futuro. El control automático necesita el desarrollo de nuevos paradigmas y metodologías capaces de afrontar estos nuevos retos.

En concreto, algunos campos por desarrollar y en los que se esperan grandes avances en el futuro son:

 Control en entornos de red, asíncronos y distribuidos. El control distribuido a través de múltiples unidades de cálculo (computadores), interconectados mediante mecanismos de comunicación basados en paquetes, permitirá aumentar la productividad de la fabricación pero, al mismo tiempo, requerirá nuevos formalismos para asegurar su estabilidad, comportamiento y robustez. Esto es especialmente cierto en aplicaciones donde no se pueden ignorar las restricciones computacionales y de comunicaciones (retardos) para efectuar las operaciones de control. El control en entornos de redes necesita nuevos paradigmas de control, en muchos casos dirigidos por eventos, y considerar sistemas donde a pesar de contar previsiblemente con mucha más información sobre los procesos a controlar, la información no estará tan estructurada como en los sistemas de control actuales. Los sistemas deberán funcionar con estructuras de información cambiantes.

- Coordinación y autonomía de alto nivel. Con mayor frecuencia cada vez se está utilizando la realimentación en los sistemas de tomas de decisiones de las empresas, como por ejemplo en la logística y gestión de la cadena de suministros, la gestión y el control del espacio aéreo, etc. En estos niveles es necesario interactuar con los niveles inferiores para obtener una coordinación adecuada entre todos ellos. Se necesitan técnicas de control que permitan abordar problemas de gran complejidad y con comunicaciones asíncronas.
- Síntesis automática de algoritmos de control con verificación y validación integrada. Los sistemas de ingeniería del futuro van a requerir la capacidad de diseñar rápidamente, rediseñar e implementar software de control en sistemas de gran complejidad. Se necesita pues diseñar herramientas cada vez más potentes que automaticen completamente el propio proceso desde el desarrollo del modelo hasta la simulación del hardware en el bucle de control incluyendo la verificación y validación del software a nivel del sistema.
- Construcción de sistemas muy fiables a partir de componentes menos fiables. Un requisito cada vez más fundamental para aumentar la seguridad de los procesos será que los sistemas deben de continuar operativos, con un funcionamiento degradado si fuera inevitable, a pesar de los fallos que se produzcan en sus componentes individuales. En el desarrollo de estos objetivos el elemento central es el papel clave que juega el control automático. Los avances producidos en las últimas décadas en el análisis y diseño de sistemas de control deben extenderse hacia niveles de mayor jerarquía de la toma de decisiones si de verdad quieren hacerse sobre bases más realistas y rigurosas. El despliegue masivo de sensores e instrumentación en red previsible en los próximos años hace posible que la fiabilidad pueda ser alcanzada por la redundancia de los sistemas. Es decir, sistemas donde el fallo de uno de sus componentes puede ser resuelto por los mecanismos de redundancia incorporados. Hay que desarrollar técnicas para detectar los niveles de redundancias mínimos que garanticen la cobertura de los fallos de sus componentes con los componentes sanos.
- Desarrollos de sistemas de control fácilmente configurables o auto-configurables. Siste-

mas de tipo *plug and play* que necesiten poca labor de configuración y que puedan reconfigurarse automáticamente cuando se producen fallos en alguno de sus nodos, de forma que los restantes puedan hacerse cargo de las misiones asignadas a los nodos con fallos. De esta manera aumentará la **flexibilidad** y **seguridad** de los equipos y sistemas de producción. La complejidad previsible tanto en tamaño como en topologías cambiantes hace pensar que las tareas de configuración sean cada vez más complicadas. Se trata de desarrollar sistemas que sean capaces de configurarse automáticamente, detectando a los otros sistemas conectados y a su vez informar a éstos de sus características.

- Sistemas de control capaces de hacer frente a retardos. Son sistemas de control que pueden funcionar adecuadamente aún en presencia de retardos, bien inherentes a los procesos o a los introducidos por las redes de sensores. Las técnicas de control desarrolladas para sistemas con retardos han sido diseñadas para sistemas monovariables, con estructuras fijas. Es necesario disponer de técnicas para tratar tiempos muertos en sistemas complejos, multivariables, con estructuras cambiantes y tiempos muertos variables, con cierto carácter aleatorio y que dependen del estado de los otros componentes del sistema.
- Sistemas de control óptimo. Para optimizar la productividad es necesario desarrollar sistemas y técnicas de control, que permitan optimizar el funcionamiento de los procesos teniendo en cuenta las restricciones de operación y las impuestas por las redes de sensores y capaces de ser aplicados a sistemas complejos. Es necesario desarrollar sistemas de control óptimo como controladores predictivos que puedan hacer frente a restricciones de operación del proceso y a las inducidas por las redes de comunicaciones y a los errores e incertidumbres del modelado.
- Sistemas de identificación y estimación de estado. Para reducir los costes de la utilización de sensores, o para los casos en los que son inviables, son necesarios nuevos sistemas de identificación de modelos y estimación del estado que sean capaces de operar en entornos complejos y distribuidos, sistemas que sean capaces de hacer frente a estructuras de datos cambiantes, pérdidas de datos, retrasos y a cantidades masivas de información de carácter heterogéneo.
- Sistemas de control estocásticos. Son sistemas de control cuyos objetivo se plantea teniendo en cuenta la naturaleza aleatoria de los sistemas. Se trata de obtener los mejores resultados en término de las probabilidades de las perturbaciones, ruidos o incertidumbres. Este enfoque permite aumentar la **seguridad** de los sistemas.
- Métodos de optimización heurísticos. Se requieren algoritmos aproximados y algoritmos estocásticos de optimización con objeto de determinar y reducir el número de muestras necesarias para obtener resultados con los niveles de significación requeridos.

También se recomienda, potenciar las siguientes líneas de I+D+i en las que se prevé que se obtengan resultados fructíferos que hagan aumentar la productividad de la industria y que van a protagonizar las revoluciones tecnológicas de los próximos años.

- Desarrollo de controladores más fiables, eficientes, ecológicos y baratos.
- Desarrollos de controladores para **sistemas complejos** en los que la información disponible es cada vez menor y con más incertidumbre.
- Desarrollo de controladores en campos nuevos como la biología, nano-tecnología, sistemas cuánticos, ciencias ambientales, medicina. Asimismo, creación de grupos multidisciplinares en los que se establezcan sinergias entre los especialistas en control automático y estas disciplinas.
- Adaptación de nuevos tipos de sensores, accionadores y de procesado de la información y de comunicación.
- Incorporación de nuevos desarrollos en los campos de la matemática y del tratamiento de la información.

En cuanto a las aplicaciones se refiere, se esperan grandes avances en la aplicación de las técnicas de control desarrolladas a procesos en la mayor parte de los sectores industriales y en otros ámbitos como el urbano y el doméstico. En concreto campos como el control de tráfico, control de sistemas de captación, tratamiento y distribución de aguas, sistemas de prevención de avenidas se consideran como temáticas donde las técnicas de control descritas anteriormente van a experimentar un desarrollo considerable.

El sector energético, y más específicamente el sector de energías renovables, como solar, viento o hidrógeno que está experimentando un fuerte crecimiento y que en muchos aspectos se encuentra todavía en desarrollo va a necesitar de nuevas técnicas de control específicas para estos sistemas. Al contrario de otros sistemas energéticos donde la variable fundamental para controlar el sistema es la cantidad de energía aportada, en el caso de los sistemas de energías renovables la fuente primaria de energía no puede ser manipulada. El recurso no está continuamente garantizado y ha de ser aprovechado al máximo cuando el recurso esté disponible. Estos sistemas suelen ser además sistemas híbridos en los que se han de controlar y gestionar diversas fuentes energéticas maximizando la utilización de las fuentes renovables.

7.2. Recomendaciones estratégicas sobre el sector industrial

Resulta difícil plantear el estado actual y las demandas del sector industrial en relación con el control automático, porque toda la industria usa el control automático. Todas las empresas se ven afectadas por sus cambios y mejoras. Pero además de las empresas que usan el control automático hay algunas que comercializan productos para el control automático y unas pocas que desarrollan e innovan en control automático.

La situación del control automático en España, es por tanto, buena en el sentido del alto grado de automatización de la industria, pero mala en el sentido de que son pocos los productos y las empresas españolas que generan nuevos resultados. Una muestra de la importancia del control automático en España es ISA (*International Society for Automation*). La sección española cuenta con más de 400 asociados que cubren todos los ámbitos, desde el puramente consumidor de control automático hasta el más innovador, así como cuatro secciones de estudiantes muy activas.

Una de las máximas que usa esta organización, aunque no la única, es la de «piensa global y actual en local», para referirse a la necesidad de disponer de toda la información posible en un mundo con un mercado tecnológico globalizado y de actuar en los sectores más próximos que se tengan disponibles. En sus reuniones se han analizado con frecuencia las necesidades y características del sector para un mejor desarrollo de la automática, entre las que se encuentran las siguientes:

- Falta de reconocimiento oficial de la profesión.
- Las dificultades para amortizar sistemas de control diseñados a medida para un cliente.
- Falta de especialistas que dominen simultáneamente las nuevas tecnologías informáticas y las nuevas técnicas de control automático.
- Mercado muy cambiante, tanto en objetivos de control y optimización como de los dispositivos o sistemas a controlar.

Estas reflexiones ponen de manifiesto que hay todavía un distanciamiento muy grande entre las universidades y centros de I+D+i y las empresas. Sin embargo, en el análisis realizado por la fundación Cotec en 2008 sobre la automatización se señala en relación con las empresas que el factor más crítico es el retraso relativo que tienen en la movilización del sistema de I+D+i. La inversión es muy baja en relación con otros países de nuestro entorno. Señala «una desvinculación relativamente importante del sector español de la evolución tecnológica de su entorno».

Dicho informe apunta también «Probablemente mucho tiene que ver con la insuficiente confianza que tiene la empresa en su capacidad de gestionar directamente el trabajo de investigación, algo que también afecta al resto de la UE; ... Esta diferencia tan significativa en lo que a la investigación realizada en las empresas se refiere, no es compensada por una mayor actividad contractual con organismos de investigación externos a ellas».

Para mejorar esta situación se proponen las siguientes líneas estratégicas generales:

- Desarrollar campañas de información en las empresas que muestren las ventajas competitivas de disponer de know how propio y de valor añadido incorporando técnicas propias de control automático en sus productos.
- Desarrollar actividades de difusión de resultados de los centros de I+D+i en las empresas para favorecer la utilización de estos centros como parte de la I+D+i de las empresas.
- Desarrollar nuevos modelos de relación universidad-empresa que potencien la investigación a más largo plazo y no sólo para desarrollos puntuales, que incluyan mecanismos tales como ventajas fiscales y primar la explotación de patentes y de nuevos desarrollos.
- Establecer mecanismos de impulso y apoyo a la creación de empresas de alta tecnología, facilitando el desarrollo de proyectos y la transferencia de tecnología, o para facilitar la reorientación de negocio hacia desarrollos con mayor grado de I+D+i.

7.2.1. Oportunidades

Se revisan ahora las tendencias actuales en la evolución de aplicaciones, mercados y productos, especialmente en lo que se refiere a la incidencia del control automático como uno de los elementos básicos en dicha evolución.

La evolución de la tecnología aplicable al desarrollo de microprocesadores está lejos de llegar al límite, sigue aumentado la capacidad de procesado por mm², la velocidad de cálculo y la reducción del consumo de energía necesario. Esta evolución posibilita la utilización de algoritmos más complejos y potentes a pesar de la reducción en el tamaño y peso de los equipos y del aumento en la autonomía de los mismos.

Por otra parte, esta evolución en el aumento de la potencia de cálculo y proceso incide directamente en el aumento de la capacidad de almacenamiento de datos y en las posibilidades de comunicación para la transmisión de información entre dispositivos. Este incremento de la potencia en el tratamiento de la información (cálculo, almacenamiento, comunicación) facilita la aplicación del control automático, ya que el control automático se concreta muchas veces en un *software*, en unos algoritmos. Este incremento de potencia permite también el desarrollo y la aplicación de algoritmos de control más potentes, lo que da mayor importancia a la investigación y desarrollo en control automático.

Además, en un mundo cada vez más competitivo, el efecto dinamizador del control automático supone incrementar el valor añadido que se puede incorporar en dispositivos y productos. Por otra parte, la evolución tecnológica ha dado lugar a una sociedad más exigente, por lo que los mercados demandan productos con este valor añadido. Los países

capaces de aportarlo y las empresas capaces de suministrar al mercado productos con estas características tienen muchas más posibilidades de competir con ventaja en los mercados globales.

Nuevos productos

En los últimos años ha habido un desarrollo importante de los denominados sistemas empotrados (en inglés: embedded computing systems). Tal como se destaca en (Konstantellos, 2008), «estos dispositivos tienen una importancia estratégica en el desarrollo tecnológico de nuestra sociedad e impulsan la competitividad en áreas industriales clave, como son la automoción y la aviónica, la electrónica de consumo y las comunicaciones, así como la automatización en la industria manufacturera». Estos dispositivos disponen de una potencia de cálculo muy importante, lo que les permite incorporar funciones inteligentes que aparecen empotradas en componentes y sistemas: robots, máquinas e instrumentos, equipos de electromedicina, vehículos, dispositivos móviles, controladores industriales, etc.

La importancia de estos dispositivos está en la inteligencia que aportan y esta inteligencia no es otra cosa que una combinación de sensores, algoritmos y accionadores para realizar determinadas funciones con gran velocidad y exactitud. Esta inteligencia, los algoritmos que la constituyen, son fruto de los desarrollos y trabajos en el control automático.

Nuevas aplicaciones

Los desarrollos en las comunicaciones, en nuevos soportes informáticos (procesado y memoria) y la extensión en la utilización amplia de estándares posibilita la aparición de nuevas aplicaciones. Ejemplo de ello es el desarrollo de dispositivos portátiles para su aplicación en el hogar, la oficina, el vehículo, la fábrica, el hospital, etc.: microteléfonos, teléfonos inteligentes, PDAs, mini vídeo-cámaras, dispositivos de posicionamiento y navegación, dispositivos de guiado automático, sistemas de diagnóstico automático, equipos de soporte en quirófano, vehículos autónomos de vigilancia, etc.

Una de los proyectos de investigación y desarrollo en esta área lo lleva a cabo el consorcio 2008 IPAC (*Integrated Platform for Autonomic Computing*), dentro del séptimo programa marco de la Comisión Europea para la Sociedad de la Información (*http://ipac. di.uoa.gr/*), que tiene por objetivo proporcionar un entorno de creación de servicios y un *middleware*⁴ para desarrollar servicios empotrados, inteligentes, colaborativos, sensibles

⁴ El *middleware* es un *software* de conectividad que ofrece un conjunto de servicios que hacen posible el funcionamiento de aplicaciones distribuidas sobre plataformas heterogéneas. El middleware nos abstrae de la complejidad y heterogeneidad de las redes de comunicaciones subyacentes, así como de los sistemas operativos y lenguajes de programación, proporcionando una interfaz de programación de aplicaciones (API) para la fácil programación y manejo de aplicaciones distribuidas.

al contexto sobre nodos móviles en las áreas a las que se orienta la denominada informática empotrada, móvil y diseminada: seguridad en el tráfico de vehículos, fabricación (control de calidad y robótica), conservación de la energía, (eficiencia energética y control del consumo), supervisión de redes de consumo de energía, infraestructuras de comunicación para la difusión de alertas y gestión de situaciones de emergencia.

Nuevos mercados

El control automático asociado a la electrónica, la informática y las comunicaciones está facilitando el desarrollo de numerosas aplicaciones que se están concretando en nuevos dispositivos y servicios en diferentes mercados. Entre ellos, cabe destacar:

- Salud y servicios asistenciales (The Economist, 2009).
- Comunicaciones.
- Tráfico y vehículos.
- Energía y sostenibilidad (European Commission, 2009).
- Automatización en el hogar (Home Automation).
- Inteligencia artificial. Análisis, diagnóstico y toma de decisiones.

7.2.2. Posibilidades y recomendaciones

En el informe sobre Automatización Integral en la Empresa Industrial (Fundación OPTI y Fundación ICT, 2007) se constata que «Actualmente, ante los retos que presenta la globalización y la fuerte presión de los mercados emergentes, los sectores industriales están inmersos en una espiral de esfuerzos que les permitan aumentar sus cuotas de competitividad. Ante esta coyuntura, la industria española ve cada vez más claro que su futuro puede estar en manos de la inversión en tecnologías para la automatización de sus empresas, que les permitirá reducir los tiempos de ciclos de producción, aumentar la flexibilidad o mejorar las tasas de calidad y de seguridad».

En los apartados anteriores nos hemos referido a los nuevos mercados que abre el desarrollo del control automático (la triple C: computador – control – comunicaciones) y a la gran diversidad de productos de alto valor añadido que proporciona y que tan solo es una muestra de lo que está por llegar. También se ha analizado la situación de la I+D+i en la industria española y se ha comparado con la de otros países de la Unión Europea. El conjunto de todas ellas permite llegar a las siguientes recomendaciones sobre líneas estratégicas del área del control automático y las tecnologías que le dan soporte:

• Inversión en I+D en estas áreas para el desarrollo de nuevos productos y servicios. El futuro ofrece atractivas perspectivas para la economía de los países por el alto valor añadido que incorporan y los nuevos mercados a los que se dirigen.

- Las empresas deben invertir en modernizar sus equipos e instalaciones de producción para garantizar su eficiencia y competitividad en un mercado global.
- Invertir en la formación de técnicos y científicos en estas áreas.
- Es imprescindible para los países crear y disponer de las infraestructuras de soporte necesarias para sacar el máximo aprovechamiento de las nuevas aplicaciones y productos que van a ofrecer estas nuevas tecnologías.
- Para el desarrollo de España, de su economía, de su sociedad y de sus ciudadanos, es preciso disponer en el propio país de centros productivos de investigación y desarrollo, tanto públicos como privados. En este último sentido es importante favorecer la existencia de centros de investigación de las empresas ubicados en nuestro país a pesar de que la distribución del capital accionarial de las mismas no nos favorece. Si formamos técnicos y científicos pero los centros de investigación y de decisión están fuera de España probablemente nos seguiremos encontrando con una importante fuga de cerebros.
- Es necesario diseñar y llevar a cabo las estrategias adecuadas para que España sea un polo de atracción para centros de investigación y científicos de todo el mundo en las áreas relacionadas con el control automático y para que existan empresas tractoras en investigación, desarrollo e innovación en la triple C.

7.3. Recomendaciones estratégicas sobre la formación

Tal como se ha señalado en la sección 5.1 las universidades españolas se están adaptando a las directrices emanadas para la integración en el espacio europeo de educación superior dentro de los acuerdos de Bolonia y han propuesto o están proponiendo planes de estudios para los títulos de grado y máster. Como se ha indicado, el control automático puede y debe ser uno de los elementos dinamizadores de la innovación en España. Este objetivo tiene como principal requisito la formación.

La situación actual permite definir perfiles que irán desde el ingeniero generalista hasta un especialista en diferentes aspectos del control automático. Esta diversidad de perfiles es justo lo que se necesita para dotar al país de profesionales que puedan incorporarse con éxito al mundo laboral y al mismo tiempo con suficientes conocimientos sobre el *know how* necesario para abordar la mejora continua en los productos y sus procesos de producción.

- Los centros de I+D+i tienen una formación que se puede considera competitiva con el resto del mundo.
- La formación de profesionales, no siempre bien estructurada, puede encontrar un

marco perfecto dentro del espacio europeo de educación superior al que se está actualmente adaptando la universidad española.

- Las empresas demandan este know how, aunque de manera focalizada en su producto de hoy.
- La transformación de las empresas de ingeniería que instalan metodologías o sistemas en empresas que diseñan metodologías o sistemas es posible con la formación y la financiación adecuada.

La diversidad de títulos y de itinerarios formativos permite un amplio margen para generar profesionales adaptados a las necesidades del país y de cada región española. Para conseguir este objetivo se proponen las líneas estratégicas siguientes:

- Potenciar la creación de títulos oficiales de máster de carácter profesional, con un diseño curricular que permita la formación continua de profesionales, abordando aquellas materias que no formando parte de los planes de estudio de títulos de grado son importantes profesionalmente. La colaboración del sector industrial en estos estudios es fundamental.
- Potenciar la creación de títulos oficiales de máster orientados a la investigación que formen investigadores capaces de contribuir de manera efectiva en el desarrollo de la innovación en el sector industrial.
- Potenciar la creación de programas de doctorado que permitan la formación de investigadores del más alto nivel en áreas específicas.
- Diseñar acuerdos internacionales de colaboración con otros centros de prestigio que favorezcan el intercambio de estudiantes y de profesores. El marco europeo de intercambio ERASMUS y ERASMUS-MUNDUS junto con otros acuerdos pueden y deben ser potenciados.
- La adaptación de los planes de estudio a los currículos propuestos por entidades como IEEE o IFAC para el especialista en control automático, así como la evolución común hacía unos estándares internacionales contribuirá notablemente a la mejora de la calidad. Por ello deben apoyarse la creación y la participación de los centros de enseñanza en redes temáticas y en foros internacionales que permitan mantener y mejorar el nivel alcanzado.

Se proponen además determinadas cuestiones específicas asociadas al profesorado universitario que afectarían positivamente a la productividad en este ámbito:

 Reconocer la labor investigadora del profesorado universitario a través de un adecuado estatuto del Personal Docente e Investigador de manera que se puedan resolver los problemas ocasionados por el hecho de que la contratación de nuevo profesorado se justifica casi exclusivamente con las necesidades docentes sin tener en cuenta las necesidades de I+D+i. Permitir dedicaciones y contrataciones diferentes según las necesidades docentes e investigadoras, elegibles por el profesorado a través de un mecanismo flexible y adaptable en el tiempo, permitiría a éste concentrar sus esfuerzos en una tarea concreta y optimizar así su rendimiento.

Potenciar la posibilidad de realizar años sabáticos del profesorado universitario en
departamentos de I+D+i en empresas nacionales e internacionales, así cómo
reconocer esta dedicación, de forma similar a la que se hace por estancias en universidades extranjeras, como forma de acercarse a la «realidad» de los problemas
industriales que necesitan solución.

7.3.1. Competencias del ingeniero de control automático

Como conclusión sobre el análisis de la profesión del ingeniero de control automático se enumeran a continuación las competencias específicas que, además de las comunes a otras ingenierías, debe poseer un ingeniero especialista en control automático.

- Conocimiento y capacidad para el modelado y simulación de sistemas.
- Conocimientos de regulación automática y técnicas de control básicas y avanzadas y su aplicación a la automatización industrial.
- Conocimientos de principios y aplicaciones de los sistemas robotizados.
- Conocimiento aplicado de informática industrial y comunicaciones.
- Conocimiento aplicado de instrumentación.
- Capacidad para diseñar sistemas de control y automatización industrial.
- Capacidad de integración de sistemas.
- Visión sistémica de los problemas industriales.
- Conocimiento y capacidades para proyectar y diseñar instalaciones y sistemas automatizados, incluyendo instalaciones domóticas.
- Conocimientos de inspección industrial.

Las funciones y puestos profesionales que pueden y deben desempeñar los ingenieros de control automático son:

- Especialistas en diseño, instalación, mantenimiento y operación de sistemas automatizados.
- Instrumentistas.
- Técnicos de salas de control.
- Automatización de máquinas, procesos y sistemas.
- Implantación y gestión de sistemas industriales informatizados.

- Integradores de sistemas.
- Técnicos en entornos de entrenamiento basados en simulación de sistemas.
- Desarrollo, implantación y mantenimiento de sistemas de inspección automatizada.
- Desarrollo, implantación y mantenimiento de sistemas de ayuda a la toma de decisiones en producción.
- Diseño e implantación de sistemas integrados.
- Ingenierías de automatización.
- Empresas suministradoras de equipos y sistemas. Soporte técnico.

7.4. Recomendaciones estratégicas sobre la I+D+i

La situación en España de los centros de I+D+i que desarrollan su actividad investigadora, total o parcialmente en control automático es buena. Tal como se ha señalado, estos centros, en general, han aprovechado bien los escasos recursos disponibles y han contribuido notablemente al desarrollo del control automático.

La situación de la I+D+i es bien conocida e informes anuales como el ya mencionado de Cotec de 2008 muestran su evolución y, sobre todo, el estado respecto a otros países. La característica fundamental es que la inversión pública es escasa y la privada casi nula. En el informe Cotec de 2008 se recogen diferentes tablas sobre los Recursos Humanos en Ciencia y Tecnología (HRST). Estos datos se refieren exclusivamente a la población entre 16 y 73 años y se realiza según las recomendaciones del «manual de Camberra», salvo alguna pequeña adaptación propia de la UE.

Los HRST que se encuentran empleados como profesionales se subdividen en cuatro subgrupos en función de las áreas en las que trabajan: física, matemáticas e ingeniería, ciencias de la vida y la salud, enseñanza y otras. El núcleo de HRST lo componen las personas con una educación de tercer nivel que se encuentran ocupadas como profesionales o técnicos en actividades de ciencia y tecnología. Los HRSTE son personas que han completado una educación de tercer nivel incluye todas las ramas de estudio, y a cualquier persona que haya completado el tercer nivel de educación. Los HRSTO son personas empleadas en una actividad de ciencia y tecnología en los niveles ocupacionales ISCO 2 e ISCO 3. Los SE son científicos e ingenieros empleados en actividades de ciencia y tecnología. La tabla 7.1 muestra los datos comparativos con los principales países europeos y Polonia.

La situación de los Centros de I+D+i es adecuada, como ya se ha indicado, pero la rentabilidad, en términos de transferencia de tecnología, debería mejorar.

	Alemania	España	Francia	Italia	Polonia	Reino Unido
HRST	43,2	39,8	41,1	34,6	31,4	42,4
HRSTE	26,4	35,0	29,9	16,0	22,0	33,4
HRSTO	34,5	23,4	29,9	30,4	24,3	28,0
HRST núcleo	17,7	18,6	18,7	11,8	14,9	19,0
SE	6,0	4,8	5,5	3,2	5,3	5,5

Fuente: «Science and technology. Human Resources in Sciencie & Technology statistics», EUROSTAT (2008). Último acceso: 17/01/2008.

Tabla 7.1. Recursos humanos en ciencia y tecnología (HSRT) según categorías en España, Polonia y los cuatro grandes países europeos, 2006.

Para algunos analistas (Inés Macho de la UAB) «El porcentaje de la población ocupada en España que realiza actividades de I+D (9,1% de la población activa en 2005) se encuentra más cerca de la media Europea (10,1%). Sin embargo, la cantidad de investigadores no es el único dato que importa. Si se analiza el gasto medio por investigador (en dólares a paridad de poder de compra constante) el gasto en España es de 122 \$PPC, mientras que en Alemania es de 227,4 \$PPC, en Italia es de 219,4 \$PPC, en Francia de 199 \$PPC y en el Reino Unido de 194,9 \$PPC. Por ello, los investigadores que España puede atraer y mantener no son los mismos que consiguen otros países y podemos conjeturar que el tipo de I+D que se puede llevar a cabo en nuestro país será, con excepciones, de menor impacto que el realizado en países que dedican mayores recursos a la generación de conocimiento e innovaciones».

Se pueden concluir las siguientes recomendaciones estratégicas sobre I+D+i:

• Aumentar el apoyo a la investigación básica. No sólo no se debe acudir a la excusa de la actual crisis económica para recortar gastos en I+D+i sino, más bien al contrario, se debe aprovechar para conseguir un mejor posicionamiento de España en el contexto internacional. Es necesario seguir aumentado el gasto en I+D+i como proporción del PIB y es importante hacerlo no cediendo a la tentación de asignar los fondos a los científicos. Una política del tipo «café para todos» no sería ni oportuna ni conveniente y en este sentido tecnologías de carácter estratégico como el control automático deberían jugar un papel relevante. Además de aumentar los gastos en I+D+i es preciso hacerlo apoyando la investigación académica (la investigación básica) de calidad, es decir identificando la excelencia y apoyándola, de modo que los mejores investigadores trabajen en condiciones adecuadas, atraigan a otros investigadores a sus equipos y se dote al sistema de la flexibilidad suficiente para que los científicos puedan dedicarse a su trabajo con las menores trabas administrativas posibles. El objetivo es tener algunas de nuestras universidades y centros de investigación clasificados entre los mejores de Europa y del mundo.

- Promover programas que permitan atraer a algunos de los mejores científicos del mundo. Los investigadores, sobre todo los que son buenos y han sido formados en el ámbito internacional, reciben ofertas para trabajar en los mejores equipos de investigación. En este sentido es un objetivo prioritario generar las condiciones y estímulos que hagan atractivo a los investigadores desarrollar su trabajo en nuestro país. Los investigadores de prestigio sólo decidirán investigar en España si las condiciones que se les ofrecen son comparables con las que tienen en otros países. Como los futbolistas, los científicos no son todos iguales y por tanto no todos reciben las mismas ofertas ni trabajan por el mismo contrato. Sería agradable que España tuviese el orgullo de tener tan buenos científicos como deportistas.
- Apoyar proyectos empresariales de calidad y sobre todo la creación de nuevas empresas de base tecnológica. Es necesario impulsar la I+D+i de las empresas que tengan proyectos ambiciosos e innovadores. Pero sobre todo es preciso apoyar financiera y administrativamente la creación de empresas innovadoras, empresas que se creen para explotar descubrimientos y mejoras tecnológicas, empresas que demanden y generen innovación y que permitan cambiar el marco productivo del país. Para llegar al 3% de gasto en I+D+i no basta con aumentar el gasto público, es preciso que las empresas también inviertan. Pero sólo empresas en sectores que produzcan utilizando innovaciones recientes y que usen tecnología de última generación tendrán esta inquietud y ésta no es una característica del tejido industrial español a día de hoy.
- Promover las relaciones entre el mundo académico e industrial. Además de incrementar el nivel de la innovación básica, de atraer buenos científicos y de aumentar la innovación realizada por la industria, conviene mejorar los puentes entre ambos mundos. No se trata de intentar que los académicos hagan investigación más aplicada (centrada en resultados de corto plazo) o que las empresas se interesen por realizar investigación básica. Se trata de conseguir que las innovaciones obtenidas por la investigación básica lleguen a la industria, no acercando los dos mundos, sino estableciendo sólidos puentes, instituciones que hagan de interlocutores especializados y eficientes entre los científicos y las empresas. Estas organizaciones, las oficinas de transferencia de tecnología y los parques científicos, deben jugar un papel importante en el desarrollo futuro y la competitividad del país. Seguramente no hacen falta más instituciones de este tipo de las que tenemos pero su organización, composición y cometidos deben ser distintos. Las instituciones puente sólo podrán cumplir su papel si están bien diseñadas y cuentan con científicos y gestores que puedan realizar la transferencia de conocimientos o facilitar la creación de spin-offs con éxito.
- Apoyar la excelencia de la labor investigadora con acciones y programas específi-

cos y a largo plazo. La excelencia de los grupos de investigación se deberá evaluar con múltiples indicadores tanto clásicos (artículos, patentes), como nuevos (reconocimiento internacional y nacional, proyectos europeos y nacionales de extrema competitividad, proyectos de transferencia efectiva de tecnología, iniciativas de lanzamiento de líneas innovadoras). Se valorará positivamente la continuidad innovadora de sus líneas de investigación y los resultados previos.

- Focalizar las líneas prioritarias de investigación en contra de la política de dispersión de las mismas. Se pretende que el apoyo a la investigación sirva para concentrar esfuerzos y para generar conocimientos mucho más valiosos. Se deberían crear mecanismos que impidieran la duplicidad de la inversión pública para las mismas investigaciones. También se deberían potenciar los mecanismos de control de los resultados, factor que debe ser determinante para conseguir financiaciones futuras.
- Ampliar los sistemas de almacenamiento e intercambio del conocimiento generado durante las investigaciones con subvenciones públicas. Los resultados de estas deben ser públicos y puestos a disposición de la comunidad científica. Estos sistemas deberían ser tutelados por organismos públicos, generando bases de datos colaborativas. También deberían ser usados de forma intensiva a la hora de adjudicar ayudas de investigación.
- Coordinar las ayudas nacionales y de las comunidades autónomas para conseguir un mejor rendimiento. Esta situación ya ha sido puesta de manifiesto por diferentes foros, la OCDE manifestó la necesidad de esta coordinación porque «se ponían dificultades en el acceso a las ayudas, hay una gran dispersión en el destino de los fondos y hay una escasez de investigadores».

8Bibliografía

- ABI Research (2005): Automotive sensors: market strategies for accelerometers, gyro, Hall effect, optics, pressure, radar and ultrasonic sensors. Report Code RR-AS.
- Albertos, P., v Mareels, I. (2009): Feedback control for everyone. Springer.
- Antsaklis, P.; Basar, T.; Carlo, R. de; McClamroc, N.H.; Spong, M., y Yurkovich, S. Eds. (1998): NSF/CSS workshop on new directions in control engineering education, National Science Foundation e IEEE Control Systems Society. http://robot0.ge.uiuc.edu/~spong/workshop.
- Aracil, R.; Basañez, L.; Dormido, S., y Martínez, M. (2003): «Conclusiones de las XXIV Jornadas de Automática», Actas de las XXIV Jornadas de Automática, León, España.
- Asimov, I. (1951-53): Foundation, Foundation and Empire, Second Foundation. Gnome Press, New York (traducción española Plaza y Janés).
- Bellman, R. E. (1957): Dynamic Programming. Princeton University Press.
- Black, F., y Scholes, M. (1973): «The pricing of options and corporate liabilities». *Journal of Political Economy*, vol 81, n. 3, pp. 637-654.
- Brock, W. A., y Malliaris, A. G. (1989): Differential equations, stability and chaos in dynamic economics. Elsevier Science, Amsterdam.
- Bryzek, J.; Abbott, H.; Flannery, A.; Cagle, D., y Maitan, J. (2003): «Control issues for MEMS». *Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control*, vol. 3, pp. 3039-3047.
- Cartwright, J. (2008): «Home run complete, LHC set to repeat it backwards». *Physics World. http://physicsworld.com/cws/article/news/35762*.
- Cerf, C. y Navasky, V. (1984): The Experts Speak: The Definite Compendium of Authoritative Misinformation, Villard Books, New York.
- Chen, Y.; Gross, P.; Ramakrishna, V.; Rabitz, H.; Mease, K., y Singh, H. (1997): «Control of classical regime molecular objectives-applications of tracking and variations of the theme». *Automatica*, vol. 33, n. 9, pp. 1617-1633.

- Comité Español de Automática (CEA) (2007): Libro Blanco de la Robótica.
- Cotec (2008): Tecnología e Innovación en España. Informe Cotec 2008, Fundación Cotec para la Innovación tecnológica.
- Council Directive 96/48/EC (1996): «On the interoperability of the trans-european high-speed rail system». EU Official Journal L 235, 17/09/1996, pp. 6-24.
- Declaración de Bolonia (1999): Declaración conjunta de los Ministros Europeos de Educación.
- Dormido, S. (2007): Automática: ¿De dónde venimos? ¿Dónde estamos? ¿Hacia dónde vamos? Lección magistral Doctor Honoris Causa por la Universidad de Huelva. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Huelva.
- Dyer, D., TRW (1998): Pioneering Technology Innovation since 1900. Harvard Business School Press.
- E-ELT Science Working Group (2006): Science Cases and Requirements for E-ELT. http://www.eso.org/sci/facilities/eelt/publ/ELT-SWG-apr30-1.pdf.
- El-Farra, N. H.; Gani, A., y Christofides, P. D. (2005): «Fault-tolerant control of process systems using communications networks». *American Institute of Chemical Engineers* (AIChE) *Journal*, vol. 51, n. 6, pp. 1665-1682.
- European Commission Directorate-General Information Society and Media (2009): Smart Manufacturing: ICT and Energy Efficiency. The Case for Manufacturing.
- Evans, W. (1948): «Graphical analysis of control systems». Trans. AIEE, 67, 547-55.
- Fleming, W. H., editor, (1998): «Future Directions in Control Theory. A Mathematical Perspective». SIAM Reports on Issues in the Mathematical Sciences. Academic Press. New York.
- Fundación OPTI y Fundación ICT (2007), Automatización Integral en la Empresa Industrial.
- Jensen, B. D.; Mutlu, S.; Miller, S.; Kurabayashi, K., y Allen, J. J. (2003): «Shaped comb fingers for tailored electromechanical restoring force», *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 12, pp. 373–383.
- Jiang, Y.; Pei, R.; Jiang, Q.; Hong, Z., y Coombs, T. A. (2007): «Control of a superconducting synchronous motor». *Superconducting Science and Technology*, vol. 20, pp.: 392-396.
- Konstantellos, A. (2008): European Commission, DG Information Society and Media: Presentation.

- Krylov, N. M., y Bogoliubov, N. (1943): Introduction to non-linear mechanics. Traducido al inglés en Princeton Univ. Press, 1963.
- Lyapunov, A. M. (1892): El problema general de la estabilidad del movimiento. Tesis doctoral, Kharkov Mathematical Society.
- Matveev, A. S., y Savkin, A. V. (2009): Estimation and control over communication networks. Birkhauser, Boston.
- Maxwell, J. C. (1868): «On Governors», Proceedings of the Royal Society, 100.
- Meer, S. van der (1984): Stochastic cooling and the accumulation of antiprotons. Nobel lecture, Estocolmo.

 http://nobelbrize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1984/meer-lecture.pdf.
- Meyer, E.; Hug, H. J., y Bennewitz, R. (2004): *Scanning Probe Microscopy: The Lab on a Tip.* Spinger-Verlag, Berlin.
- Mickle, P. (1961): A Peep into the Automated Future. The capital century 1900-1999. http://www.capitalcentury.com/1961.html.
- Minty, M. G., y Zimmermann, F. (2003): Measurement and control of charged particle beams. Springer-Verlag, Berlin.
- Murray, R. M. (2002): Control in an Information Rich World. Report of the panel on future directions in control, dynamics and systems.
- Murray, R. M.; Åström, K. J.; Boyd, S. P.; Brockett, R. W., y Stein, G. (2003): «Future directions in control in an information-rich world». *IEEE Control System Magazine*, Vol. 23, 2, 20-33.
- OCDE, Manual de Frascati (2002): Propuesta de Norma Práctica para Encuestas de Investigación y Desarrollo Experimental.
- Office of Technology Assessment (1976): Automatic Train Control in Rail Rapid Transit. United States Congress, National Technical Information Service order #PB-254738.
- Paschotta, R. (2008): «Femtosecond lasers», en Enyclopedia of Laser Physics and Technology. Wiley-VCH, Weinheim.
- Powers, W. F., y Nicastri, P. R. (2000): Automotive vehicle control challenges in the 21st century. Control Engineering Practice, vol. 8, n. 6, pp. 605-618.
- Pukrushpan, J. T.; Huei, P., y Stefanopoulou, A. G. (2004): «Control-oriented modeling and analysis for automotive fuel cell systems». *Journal of Dynamic Systems*, *Measurement and Control*, vol. 126, n. 1, pp. 14-25.

- Qin, S. J., y Badgwell, T. A. (2003): «A survey of industrial model predictive control technology». *Control Engineering Practice*, vol. 11, n. 7, pp. 733-764.
- Rutkovsky, V. Y., y Sukhanov, V.M. (2007): «Dynamics and control of flexible space structures during their assembly in an orbit». 17th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace, Toulouse, Francia.
- Sáez, X.; Solà, J., y Termes, M. (2008): Los factores de Innovación en el conjunto de la I+D+i empresarial: un análisis por sectores y comunidades autónomas. Dirección General de Política de la Pequeña y Mediana Empresa. Junio.
- Seino, H., y Miyamoto, S. (2006): «Long-term durability and special running tests on the Yamanashi Maglev Test Line». *Quarterly Report of the Railway Technical Research Institute (RTRI)*, vol. 47, n. 1 pp.1-5.
- Shaw, R. J. (2000): «NASA's Ultra-Efficient Engine Technology Program (UEET)». MITE Workshop on Goals and Technologies for Future Gas Turbines, Georgia Institute of Technology.
- Sira-Ramírez, H. J., y Silva-Ortigoza, R. (2006): Control design techniques in power electronics devices. Springer, Londres.
- Skogestad, S., y Postlethwaite, I. (1995): Multivariable feedback control: analysis and design. John Wiley & Sons.
- Slack, C. (2007): «The robot surgeon». Massachusetts General Hospital Proto Magazine, Winter 2007, pp. 38-43.
- Stein, G. (2003): «Respect the unstable», *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 23, no. 4, 12-25.
- Sun, Y. F.; Zhang, C. K., y Gao, J. G. (2008): «Feedback and stochastic volatility stock pricing model». *Proceedings of IEEE Int. Conference on Management Science and Engineering ICMSE*, pp. 1257-1263.
- The Economist (2009), Medicine goes digital. Informe especial, 18 de abril.
- Wright, P. G. (2001): Formula 1 Technology. Society of Automotive Engineers, Inc., PA, USA.
- Zewail, A. H. (2000): «Femtochemistry: atomic-scale dynamics of the chemical bond». *Journal of Physical Chemistry A*, vol. 104, pp. 5660-5694.
- Ziegler, J. G., y Nichols, N. B. (1942): «Optimum settings for automatic controllers», Transactions of the ASME, pp.759-768, (versión resumida en J. Dyn. Sys., Meas., Control, Vol. 115, 2B, 1993).

9

Sitios de Internet

Academic Ranking of World Universities

Brooklyn Technical High School

École Polytechnique, France

IFAC - International Federation of Automatic Control

Indiana State University: Distance Learning

IPAC Overview. Integrated Platform for Autonomic Computing

Ministerio de Educación, Política Social y Deporte

OSU Outreach Gateway Home Page

Ranking Mundial de Universidades en la Web:

Acerca de Nosotros

Stanford Engineering

The University of Manchester

TJHSST Academics - Science and Technology

UBA: Universidad de Buenos Aires

Universidad Nacional Autónoma de México

Université Paris-Sud 11

UW Online Learning - Home

http://www.arwu.org/

http://www.bths.edu/tech/electengineer.jsp?rn=6750755

http://www.polytechnique.fr/

http://www.ifac-control.org/

http://www.indstate.edu/distance

http://ipac.di.uoa.gr/

http://www.mepsyd.es/portada.html

http://osuoutreach.okstate.edu

http://www.webometrics.info/about_es.html

http://engineering.stanford.edu/

http://www.manchester.ac.uk/

http://academics.tjhsst.edu/scitech.html

http://www.uba.ar/homepage.php

http://www.unam.mx/

http://www.u-psud.fr/es/index.html

http://www.onlinelearning.washington.edu

10 Anexos

Anexo A

Campos y materias de control automático

En la Tabla A.1 se describe la clasificación de áreas temáticas de IFAC, donde se han incluido dos nuevas áreas temáticas para tener en cuenta aspectos o campos de interés parcialmente contemplados en la clasificación general de IFAC. Estas dos áreas temáticas se han denominado «Otros campos (Other fields)» y «Aplicaciones de control (Control applications)». Evidentemente, los campos incluidos en estas dos áreas temáticas pueden englobarse en las generales de la IFAC, por ejemplo, el campo de saturación de accionadores y control con restricciones (Actuator saturation, constrained control) se podría incluir en el de sistemas de control no-lineal (Non-linear Control Systems). El campo de Control cooperativo / coordinado / consensuado / de formaciones, agentes (Cooperative / coordinated / consensus / formation control, agents) incluye aspectos de los campos de Sistemas en Red (Networked Systems), Aeroespacio (Aerospace), Transporte (Transportation Systems), etc., si bien centrados en teorías y algoritmos de coordinación. El campo de sistemas Nano/Microsistemas ElectroMecánicos/Control Cuántico (Nano systems/ MEMs/ Quantum Control) es un área emergente que se podría incorporar en el de Sistemas Mecatrónicos (Mechatronic Systems) pero que previsiblemente merezca un campo propio. El campo de Control Predictivo Basado en Modelo (Model Predictive Control) se podría incluir en el de Control de Procesos Químicos (Chemical Process Control) y el de Sistemas con Retardos (Time Delay Systems) en el de Sistemas de Control Lineal y No-lineal (Linear and Nonlinear Control Systems). En el campo de Aplicaciones de Control (Control Applications) se ha pretendido incluir un mayor detalle de las aplicaciones que son de interés en la actualidad.

La Tabla A.2 muestra una comparación de la clasificación de IFAC con la del IEEE.

IFAC classification	Clasificación de IFAC	
Systems and Signals	Sistemas y Señales	
Modelling, Identification and Signal Processing Adaptive and Learning Systems Discrete event and Hybrid Systems Stochastic Systems Networked Systems	Modelado, Identificación y Procesamiento de Señal Sistemas Adaptativos y basados en Aprendizaje Sistemas de eventos Discretos e Híbridos Sistemas Estocásticos Sistemas en Red	

IFAC classification	Clasificación de IFAC	
Design methods	Métodos de Diseño	
Control Design Linear Control Systems Non-Linear Control Systems Optimal Control Robust Control	Diseño de Control Sistemas de Control Lineales Sistemas de Control No-Lineales Control Óptimo Control Robusto	
Computers, Cognition and Communication	Computadores, Cognición y Comunicación	
Computers for Control Computational Intelligence in Control Computers, Communication and Telematics	Computadores para Control Inteligencia Computacional en Control Computadores, Comunicación y Telemática	
Mechatronics, Robotics and Components	Mecatrónica, Robótica y Componentes	
Components and Technologies for Control Mechatronic Systems Robotics Cost Oriented Automation Human Machine Systems	Componentes y Tecnologías para Control Sistemas Mecatrónicos Robótica Automatización Orientada a Costes Sistemas Persona Máquina	
Manufacturing and Logistics Systems	Manufactura y Sistemas Logísticos	
Manufacturing Plant Control Manufacturing Modelling for Management and Control Enterprise Integration and Networking Large Scale Complex Systems	Control de Plantas de Manufactura Modelado de sistemas de Manufactura para Gestión y Control Integración Empresarial y Redes Sistemas Complejos de Gran Escala	
Power and Process Systems	Sistemas de Potencia y Proceso	
Chemical Process Control Mining, Mineral and Metal Processing Power Plants and Power Systems Fault detection, supervision & Safety of Technology Processes-SAFEPROCESS	Control de Procesos Químicos Minería y Procesado de Minerales y Metales Plantas de Potencia y Sistemas de Potencia Detección de Fallos, supervisión y Seguridad de Procesos Tecnológicos - SAFEPROCESS	
Transportation and Vehicle Systems	Sistemas de Transporte y Vehículos	
Automotive Control Marine Systems Aerospace (including UAVs) Transportation Systems Intelligent Autonomous Vehicles	Control de Automoción Sistemas Marinos Aeroespacio (con Vehículos Aéreos no Tripulados) Sistemas de Transporte Vehículos Autónomos Inteligentes	
Bio and Ecological Systems	Sistemas Biológicos y Ecológicos	
Control in Agriculture Biological and Medical Systems Modelling and Control of Environmental Systems Biosystems and Bioprocesses	Control en Agricultura Sistemas Biológicos y Médicos Modelado y Control de Sistemas Medioambientales Biosistemas y Bioprocesos	
Social Systems	Sistemas Sociales	
Economic and Business Systems Social Impact of Automation Developing Countries Control Education	Sistemas Económicos y de Negocios Impacto Social de la Automatización Sistemas en vías de Desarrollo Educación en Control	

IFAC classification	Clasificación de IFAC	
Other Fields	Otros Campos	
Actuator saturation, constrained control Cooperative/coordinated/consensus/formation control, agents Nano systems/MEMs/Quantum Control Model Predictive Control Time Delay Systems	Saturación de accionadores, control con restricciones Control cooperativo/coordinado/consensuado/de formaciones, agentes Sistemas Nano/MEMs /Control Cuántico Control Predictivo Basado en Modelo Sistemas con Retardos	
Control Applications	Aplicaciones de Control	
General Control Applications Disk drives and Data Storage Civil Engineering Structures/Buildings Motors Electro-Hydraulic-Mechanical Systems	Aplicaciones de Control Generales Unidades de Disco y Sistemas de Almacenamiento Estructuras de Ingeniería Civil/Edificios Motores Sistemas Electro-Hidráulicos-Mecánicos	

Tabla A.1. Clasificación de IFAC de las materias de control automático.

Clasificación del IEEE	Clasificación de IFAC	
	Systems and Signals	
System Identification & Adaptive Control Discrete Event Systems II Hybrid Systems Networks and Communications	Modelling, Identification and Signal Processing Adaptive and Learning Systems Discrete Event and Hybrid Systems Stochastic Systems Networked Systems	
	Design Methods	
Computer-Aided Control System Design Nonlinear Systems and Control Behavioral Systems Theory	Control Design Linear Control Systems Non-Linear Control Systems Optimal Control Robust Control	
	Computers, Cognition and Communication	
Intelligent Control	Computers for Control Computational Intelligence in Control Computers, Communication and Telematics	
Manufacturing Automation and Robotic	Mechatronics, Robotics and Components	
	Components and Technologies for Control Mechatronic Systems Robotics Cost Oriented Automation Human Machine Systems	
Control de Estructuras, Vibraciones y Movimientos		

Clasificación del IEEE	Clasificación de IFAC	
Manufacturing Automation and Robotic Control	Manufacturing and Logistics Systems	
Flow control, MEMS, Semiconductors Distributed Parameter Systems	Manufacturing Plant Control (semiconductors) Manufacturing Model. for Management and Control Enterprise Integration and Networking Large Scale Complex Systems	
	Power and Process Systems	
Industrial Process Control Energy Processing and Power Systems	Chemical Process Control Mining, Mineral and Metal Processing Power Plants and Power Systems SAFEPROCESS	
	Transportation and Vehicle Systems	
Automotive Control Aerospace	Automotive Control Marine Systems Aerospace Transportation Systems Intelligent Autonomous Vehicles	
Systems Biology	Bio- and Ecological Systems	
	Control in Agriculture Biological and Medical Systems Modelling and Control of Environmental Systems Biosystems and Bioprocesses	
	Social Systems	
Control Education Quantum Molecular Control Nano and meso systems	Economic and Business Systems Social Impact of Automation Developing Countries Control Education Nano systems/MEMs/Quantum Control	

Tabla A.2. Comparación de la clasificación del IEEE e IFAC en control automático.

Anexo B

Algunos datos sobre formación en control automático en España

2.° Curso	3.° Curso	Optativas
Ingeniería de Control I Automatización Industrial I	Ingeniería de Control II Automatización Industrial II	Ingeniería de Control III Control Inteligente Simulación de Sistemas Dinámicos Robótica Industrial

Tabla B.1. Asignaturas del Grado en Electrónica Industrial y Automática en la Universidad Carlos III de Madrid.

Denominación del Máster	Universidad
Ingeniería y Control de Procesos Medioambientales (Strathclyde, Pavía, UAB, Gerona)	Autónoma de Barcelona
Robótica y Automatización	Carlos III
Ingeniería eléctrica, electrónica y automática	Carlos III
Ingeniería Informática	Complutense de Madrid
Control de Procesos Industriales	Córdoba
Informática industrial y automática	Girona
Ingeniería de Control, Sistemas Electrónicos e Informática Industrial	Huelva
Sistemas electrónicos avanzados	País Vasco
Ingeniería de control, automatización y robótica (pendiente de aprobación)	País Vasco
Producción automatizada y robótica	Politécnica de Cataluña
Automática y robótica	Politécnica de Cataluña
Automatización y control industrial	Politécnica de Cataluña
Automática y robótica	Politécnica de Madrid
Tecnologías de la información en fabricación	Politécnica de Madrid
Automática e informática industrial	Politécnica de Valencia
Sistemas Telemáticos e informáticos	Rey Juan Carlos
Tecnologías de la información y sistemas informáticos	Rey Juan Carlos
Inteligencia artificial	Rovira i Virgili
Sistemas inteligentes	Rovira i Virgili
Sistemas Inteligentes	Salamanca
Ingeniería Automática, Robótica y Telemática	Sevilla
Ingeniería de Sistemas y Control (pendiente de aprobación)	UNED y Complutense de Madrid
Investigación en Ingeniería de Procesos y Sistemas	Valladolid
Ingeniería de Sistemas e Informática	Zaragoza

Tabla B.2. Algunos ejemplos de másteres implantados en España en el curso 2008/09 que tienen relación con el control automático.

Primer curso (60 ECTS)	Segundo curso (60 ECTS)	Optativas
Ingeniería de Control	Tesina de Máster	Sistemas de Fabricación Integrada
Modelado de Sistemas Dinámicos	Temas Profesionales de Automática e Informática Industrial	Visión por Computador
Sistemas de Percepción	Temas Avanzados de Automática e Informática Industrial	Robótica Industrial Avanzada
Control y Programación de Robots	Dispositivos Industriales para el Control	Técnicas Avanzadas de Optimización y Control de Procesos
Simulación de Sistemas Dinámicos	Implementación de Sistemas de Control	Informática Industrial Avanzada
Optimización y Control Óptimo		Robótica Móvil
Sistemas de Producción Integrados		Sistemas Distribuidos y Redes Industriales
Instrumentación Industrial		Supervisión. Sistemas de Control Basados en Red. Tolerancia a Fallos
Informática Industrial		Control Avanzado (no Convencional, Heurístico, no Lineal)
Arquitecturas de Control		
Sistemas Informáticos de Tiempo Real		
Modelado y Control Experimental		
Redes Neuronales		
Diseño y Aplicaciones de Sistemas Distribuidos		
Redes Locales Industriales		
Diseño Asistido por Computador		
Trabajo Dirigido		

Tabla B.3. Máster oficial en Automática e Informática Industrial (2008/09), Universidad Politécnica de Valencia.

Anexo C

Grupos de investigación españoles en control automático

Grupo	Entidad	Líneas de investigación
AUROVA: grupo de automática, robótica y visión artificial	Universidad de Alicante	 Visión por computador, robótica Laboratorios virtuales e innovación tecnológica-educativa
Grupo de automática, electrónica y robótica	Universidad de Almería	 Control predictivo, adaptativo y robusto Sistemas de comunicaciones Modelado y simulación de procesos industriales Técnicas de control aplicadas a procesos agrícolas y energías renovables
LOGISIM: grupo de modelado y simulación de sistemas logísticos	Universidad Autónoma de Barcelona	 Modelado y simulación Optimización logística y de la producción Herramientas de soporte a la decisión
Grupo de automatización y sistemas avanzados de control	Universidad Autónoma de Barcelona	– Teoría y práctica de la ingeniería de control
Grupo automática, procesamiento de señales e Ingeniería de sistemas	Universidad de Cádiz	 Modelado, identificación y control robusto de sistemas tolerantes a fallos Automatización, supervisión y técnicas de control experto Técnicas de formación en ingeniería y realidad virtual en control Sistemas caóticos, control en tiempo real
Grupo de informática y automática	Universidad de Cantabria	 Modelado, optimización y control avanzado Guía, navegación y control de vehículos marinos, automatización naval
Grupo de ingeniería de control	Universidad de Cantabria	 Aplicación de ultrasonidos en automatización Robótica industrial y modelado dinámico de sistemas
Laboratorio de sistemas inteligentes	Universidad Carlos III	 Sistemas inteligentes de transporte Fabricación integrada por computador Modelado y simulación de sistemas Micro-robótica
Laboratorio de robótica	Universidad Carlos III	 Robótica Modelado y simulación de sistemas Automatización industrial
Automatización y control de procesos	CARTIF (Valladolid)	 Diagnóstico industrial, control de calidad y mantenimiento predictivo Instrumentación y control de procesos Control de estructuras
Ingeniería biomédica	CARTIF (Valladolid)	 Herramientas por ordenador como ayuda para el diagnóstico y el tratamiento de enfermedades: trastornos del ritmo cardiaco, neuropatía diabética, vegetativa etc.

Grupo	Entidad	Líneas de investigación
Robótica y visión artificial	CARTIF (Valladolid)	 Visión por computador, digitalización 3D Sistemas embebidos, sistemas basados en microcontrolador. Robótica social y de servicios Aplicaciones y transferencia de tecnología.
Automatización de la identificación y seguimiento de productos en actividades de producción y logística	Universidad de Castilla- La Mancha	 Optimización de tareas en centros de distribución y logística automatizados Sistemas automatizados de manipulación de materiales Control distribuido basado en agentes Modelado, simulación y optimización de sistemas de eventos discretos
Automatización, robótica y mecatrónica	Universidad de Castilla- La Mancha	 Control automático Robótica: robots flexibles y móviles Mecatrónica Ingeniería biomédica Trazabilidad y visión por computador
Ingeniería de sistemas, control, automática y robótica (ISCAR)	Universidad Complutense de Madrid	 Control inteligente Optimización, simulación Tratamiento de imágenes Educación
PRINIA: Proyectos de ingeniería informática y automática	Universidad de Córdoba	 Control de procesos Control multivariable Técnicas avanzadas de modelado y simulación
Grupo de investigación en ciencias y técnicas cibernéticas	Universidad de La Coruña	 Instrumentación de campo inteligente Control automático y supervisión
Ingeniería de control y sistemas inteligentes	Universidad de Girona	 Diagnosis basada en casos Control estadístico multivariable Representación cualitativa de tendencias
MiceLab: Ingeniería de control y modelos intervalares	Universidad de Girona	 Modelado y simulación intervalar Detección y diagnosis de fallos Biomedicina
Control y robótica	Universidad de Huelva	Control inteligenteRobótica
Dpto. Control automático	IAI-CSIC	 Teoría de control, control de accionamientos electromecánicos Robots para medios hostiles
Dpto. Informática industrial	IAI-CSIC	 Robots y vehículos autónomos Planificación, supervisión y control de procesos complejos Optimización de procesos mecánicos
Grupo de bioingeniería	IAI-CSIC	 Captación y procesamiento de señales bioeléctrica y biomecánica. Análisis de datos biológicos Sistemas cognitivos
Ingeniería de procesos	IIM – CSIC	 Modelado matemático, simulación dinámica, identificación, optimización, control óptimo, control robusto. Procesos de la industria alimentaria, biotecnológica y biología de sistemas.
Grupo de ingeniería electrónica	Universidad de las Islas Baleares	 Guiado, navegación y control de vehículos marinos Control Inteligente Control de sistemas no lineales
Grupo de robótica, automática y visión por computador	Universidad de Jaén	 Robótica industrial, robótica móvil Aplicaciones industriales de la visión por computador Control de procesos

Grupo	Entidad	Líneas de investigación
Grupo de control y robótica	Universidad de La Laguna	 Modelado y simulación de eventos discretos Control inteligente Robótica
SUPRESS: Supervisión, control y automatización de procesos industriales	Universidad de León	 Supervisión remota de procesos complejos y deslocalizados vía Internet Herramientas avanzadas de supervisión y diagnóstico de procesos Desarrollo de laboratorios remotos vía internet
Grupo de robótica	Universidad de Lleida	Robots móvilesVisión ArtificialAgrótica
Laboratorio de automatización, robótica y visión por computador	Universidad Miguel Hernández	 Automatización y control de procesos industriales Robótica, visión artificial Control remoto vía Internet
Informática industrial	Universidad de Murcia	 Control de sistemas no lineales, Control Robusto, sistemas híbridos Robótica Sistemas de eventos discretos
Grupo de modelado, simulación y control de procesos	UNED	 Control robusto, PIDs, control predictivo, control basado en eventos Modelado y simulación de sistemas híbridos Laboratorios virtuales y remotos para la enseñanza de la automática
Grupo de informática industrial	UNED	 Guiado, navegación, modelado, simulación y control de vehículos marinos y aéreos Optimización y logística. Control de sistemas complejos, sistemas en tiempo real Robótica naval y aeroespacial Enseñanza asistida por ordenador
Laboratorio de sistemas multisensor y robótica	Universidad de Oviedo	 Navegación pedestre, monitorización de la actividad física Inteligencia basada en sensores, nuevos interfases para la inteligencia ambiental, redes de sensores
Sistemas de tiempo real industriales	Universidad de Oviedo	Sistemas de tiempo real industrialesAnálisis de sistemas de tiempo real
Entornos Integrados de Automatización: GENIA	Universidad de Oviedo	– Simulación, control, supervisión
Grupo de supervisión y diagnóstico de procesos industriales	Universidad de Oviedo	 Visualización de Información Minería de datos visual Control y Supervisión Detección e identificación de fallos
Control e integración de sistemas	Universidad del País Vasco	Sistemas distribuidos de control industrialSistemas de control en tiempo real
Robótica y sistemas autónomos	Universidad del País Vasco	Robots móvilesAprendizaje automático
Sistemas inteligentes y energía (SI+E)	Universidad del País Vasco	 Redes inteligentes y Energía renovable Control de procesos de soldadura por arco eléctrico y plasma Control robusto y control deslizante Modelado y Simulación de sistemas de elevada dimensión
Grupo de control avanzado – Nuevas energías	Universidad del País Vasco	 Control de plasma en procesos de fusión Control en energía de las olas Control en energía eólica

Entidad	Líneas de investigación
Universidad Politécnica de Cartagena	Control AvanzadoNeurotecnologíaRobótica
Universidad Politécnica de Cataluña	 Modelado y control de sistemas complejos Generación, acondicionamiento, gestión y almacenamiento de energía eléctrica
Universidad Politécnica de Cataluña	 Control no lineal, control robusto, control predictivo, sistemas de gran escala Control de vibraciones y estructuras inteligentes Control de recursos híbridos, detección de daños
Universidad Politécnica de Cataluña	 Control en red Control con recursos restringidos Control, comunicaciones y tiempo real Control de sistemas distribuidos
Universidad Politécnica de Cataluña	 Control avanzado, optimización, control predictivo/ óptimo, sistemas híbridos Modelado, identificación y simulación de sistemas dinámicos Supervisión, diagnosis y control tolerante a fallos
Universidad Politécnica de Cataluña	 Modelado de biosistemas Monitorización, diagnóstico y terapia de patologías
Universidad Politécnica de Cataluña	 Aprendizaje automático SLAM Reconocimiento de formas Asistencia al diagnóstico de imágenes médicas,
IRI (Instituto de Robótica Industrial) UPC - CSIC	 Pilas de combustible Modelado y simulación Control no-lineal, optimización y control óptimo Control operacional y manejo de recursos
Universidad Politécnica de Madrid	 Control inteligente de procesos Técnicas avanzadas de control Robots móviles interactivos Modelado del conocimiento
Universidad Politécnica de Madrid	 Arquitecturas de control autónomo Control inteligente basado en modelos Plataformas software para sistemas complejos de control
Universidad Politécnica de Madrid	 Procesamiento de señales e imágenes biomédicas Tele-medicina Instrumentación biomédica
Universidad Politécnica de Madrid	Sistemas de tiempo realSistemas de alta integridad
Universidad Politécnica de Valencia	 Simulación Sistemas de control basados en red, control de sistemas en tiempo real, control de sistemas híbridos Control digital con muestreo no convencional
	Universidad Politécnica de Cataluña Universidad Politécnica de Madrid Universidad Politécnica de Madrid

Grupo	Entidad	Líneas de investigación
Control de sistemas complejos	Universidad Politécnica de Valencia	 Análisis intervalar en modelado, control robusto, control robusto tolerante a fallos, control no-lineal Lógica borrosa y redes neuronales Learning control y técnicas de identificación y control iterativo Modelado, sensorización y control de biorreactores
Control predictivo y optimización heurística	Universidad Politécnica de Valencia	 Control predictivo basado en modelos Técnicas de optimización avanzada multiobjetivo aplicadas a control, modelado y simulación de procesos y sistemas
Supervisión y diagnóstico en automatismos y sistemas de control	Universidad Politécnica de Valencia	 Control de sistemas de generación renovable, control de sistemas electrónicos de potencia Diagnosis de fallos basada en modelos de eventos discretos Sistemas de eventos discretos y sistemas híbridos de control Supervisión inteligente
Informática industrial y sistemas de tiempo real	Universidad Politécnica de Valencia	 Sistemas de tiempo real distribuidos y empotrados Robótica industrial, sensores y percepción Componentes inteligentes para robots móviles
Control inteligente	Universidad Pública de Navarra	 Sistemas neuroborrosos Visión artificial, robótica móvil Control predictivo y óptimo. Identificación
Control, energía y tecnología espacial	Universidad Pública de Navarra	 Control robusto QFT Modelado y simulación Aplicaciones: tecnología espacial, energía, sistemas ambientales, industria
Control óptimo	Universidad Rey Juan Carlos	 Control óptimo Planificación de trayectorias en robots industriales Planificación de vuelos de aviones comerciales
Grupo en ingeniería de sistemas y automática	Universidad de La Rioja	 Modelado e Identificación de sistemas Control de procesos industriales complejos Redes de comunicación de aplicación al control Robótica
Grupo de modelado, simulación y optimización de sistemas industriales eléctricos y de fabricación automatizada		 Optimización y simulación de procesos industriales de producción y logísticos Energías renovables y su aplicación a edificios Metodología de modelado de sistemas dinámicos de eventos discretos, continuos e híbridos
Sistemas inteligentes de fabricación	ROBOTIKER (Zamudio, Vizcaya)	 Robótica Visión por computador Simulación de procesos industriales Automatización y control de procesos industriales
Grupo de control de procesos	Universidad de Salamanca	 Control avanzado, control térmico de instalaciones Síntesis y diseño integrado de procesos Supervisión y control avanzado de EDARS

Grupo	Entidad	Líneas de investigación
Grupo de robótica	Universidad de Salamanca	Robots autónomosSistemas inteligentes de transporteSupervisión de procesos
Automática y robótica industrial	Universidad de Sevilla	 Control predictivo Simulación de sistemas Control de sistemas de energía solar Control de sistemas con pilas de combustible
Ingeniería de automatización, control y robótica	Universidad de Sevilla	 Control robusto, control de posición de sistemas electromecánicos, control a través de la red Supervisión y control de procesos industriales. Control de sistemas solares Visión y robótica industrial
Grupo de control no lineal	Universidad de Sevilla	– Control no lineal
Control y supervisión de procesos	Universidad de Valladolid	 Informática industrial Control avanzado de procesos Modelado y simulación de procesos Supervisión de procesos Enseñanza de la automática a través de la web
Tecnologías avanzadas de la producción	Universidad de Valladolid	 Control y optimización de procesos Sistemas inteligentes Visión por computador, robótica Tecnología y Gestión Ambiental Instrumentación y Automatización
Ingeniería de sistemas y automática	Universidad de Vigo	 Informática industrial Visión artificial, Robótica móvil Automatización naval
Grupo de control no lineal	Universidad de Vigo	 Estabilidad de sistemas no lineales Técnicas de control no lineal Lógica borrosa, redes neuronales, estrategias evolutivas Sistemas con retardos y teleoperación
GISED: grupo de ingeniería de eventos discretos	Universidad de Zaragoza	 Modelado y análisis de sistemas concurrentes con aplicaciones en logística y fabricación Evaluación del comportamiento de sistemas software, redes de computadores y sistemas de fabricación. Técnicas de simulación de sistemas de eventos discretos en plataformas de bajo coste Tolerancia a fallos y seguridad
Robótica, percepción y tiempo real	Universidad de Zaragoza	RobóticaVisión por computadorSistemas de tiempo real

Anexo D

Datos utilizados para el análisis de las universidades

D.1. Relación de universidades analizadas

Se presenta a continuación la lista de universidades analizadas junto con su clasificación según el ranking ARWU de 2007. Algunas universidades que tienen una clasificación en su país superior a las que hemos analizado no se incluyen en el análisis, bien porque no realizan investigación en el campo del control automático, o por ser de relevancia inferior a la de la universidad elegida. En otros casos, la información no está fácilmente asequible y no nos ha permitido recoger datos suficientes para incluirla en el estudio.

Regional Rank	Institution	World Rank	Country	National Rank
1	Harvard Univ	1	USA	1
2	Stanford Univ	2	USA	2
3	Univ California - Berkeley	3	USA	3
4	Massachusetts Inst Tech (MIT)	5	USA	4
5	California Inst Tech	6	USA	5
7	Princeton Univ	8	USA	7
9	Yale Univ	11	USA	9
11	Univ California - Los Angeles	13	USA	11
12	Univ California - San Diego	14	USA	12
13	Univ Pennsylvania	15	USA	13
14	Univ Washington - Seattle	16	USA	14
15	Univ Wisconsin - Madison	17	USA	15
18	Univ Michigan - Ann Arbor	21	USA	18
19	Univ Toronto	23	Canadá	1
20	Univ Illinois - Urbana Champaign	26	USA	19
28	Univ California - Santa Barbara	35	USA	27

Tabla D.1. Universidades Americanas.

Regional Rank	Institution	World Rank	Country	National Rank
1	Univ Cambridge	4	UK	1
2	Univ Oxford	10	UK	2
3	Imperial Coll London	23	UK	3
5	Swiss Fed Inst Tech – Zurich	27	Switzerland	1
9	Univ Manchester	48	UK	5
10	Univ Paris 11	52	France	2
14	Tech Univ Munich	56	Germany	2
18	Uppsala Univ	66	Sweden	2
32	Lund Univ	97	Sweden	4
35-56	Univ Leuven	132	Belgium	1-4
57-80	Delft Univ Tech	154	Netherlands	5-9
81-123	Polytechnic Inst Milan	230	Italy	6

Tabla D.2. Universidades europeas.

Regional Rank	Institution	World Rank	Country	National Rank
2	Kyoto Univ	22	Japan	2
3	Australian Natl Univ	57	Australia	1
5	Osaka Univ	67	Japan	3
6	Tohoku Univ	76	Japan	4
25-42	Hong Kong Univ Sci & Tech	217	China-HK	1-4

Tabla D.3. Universidades asiáticas.

D.2. Resultados del análisis

En las Tablas D.4-D.6 se detallan las áreas temáticas que son objeto de investigación en las universidades analizadas.

IFAC	%	Total	1	2	3	5	6	8	11	13	14	15	16	17	21	23	26	35
Sistemas y Señales																		
Modelado, Identificación y Procesamiento de Señal	43,8	7	•															
Sistemas Adaptativos y basados en Aprendizaje	68,8	11	•						•									•
Sistemas de Eventos Discretos e		10																
Sistemas Estocásticos	62,5 56,3	9	•					•	•	•	•							
Sistemas en Red	75,0	12		•	•	•	•		•	•	•	•	•		•		•	•
Métodos de Diseño																		
Diseño de Control	6,3	1								•								
Sistemas de Control Lineales	6,3	1									•							
Sistemas de Control No-Lineales	75,0	12	•		•	•		•	•	•	•	•		•	•		•	•
Control Óptimo	68,8	11	•		•	•		•	•	•	•	•	•		•		•	
Control Robusto	37,5	6				•					•		•	•			•	•

IFAC	%	Total	1	2	3	5	6	8	11	13	14	15	16	17	21	23	26	35
				_	۲	<u> </u>												
Computadores, Cognición y Comunicación																		
Computadores para Control	12,5	2																
Inteligencia Computacional en	12,3	_																
Control	18,8	3	•					•					•					
Computadores, Comunicación y	.,.																	
Telemática	37,5	6	•			•			•			•	•					•
Mecatrónica, Robótica y																		
Componentes																		
Componentes y Tecnologías para Control	0,0	0																
Sistemas Mecatrónicos	18,8	3																
Robótica	62,5	10													•			
Automatización Orientada a Costes	0,0	0																
Sistemas Persona Máquina	18,8	3		•						•					•			
·	12,5	2																
Manufactura y Sistemas Logísticos Control de Plantas de Manufactura	25,0	4										•						•
Modelado de sistemas de	23,0	7																
Manufactura para Gestión y Control	12,5	2													•		•	
Integración Empresarial y Redes	0,0	0																
Sistemas Complejos de Gran Escala	81,3	13		•	•	•	•	•	•	•	•	•		•	•		•	•
Sistemas de Potencia y Proceso																		
Control de Procesos Químicos	18,8	3						•		•								•
Minería y Procesado de Minerales																		
y Metales	0,0	0																
Plantas de Potencia y Sistemas de	10.0	2																
Potencia Potención de Falles supervisión	18,8	3	•											•				
Detección de Fallos, supervisión y Seguridad de Procesos																		
Tecnológicos - SAFEPROCESS	12,5	2		•													•	
Sistemas de Transporte y Vehículos																		
Control de Automoción	18,8	3									•				•			•
Sistemas Marinos	31,3	5		•				•			•		•		•			
Aeroespacio (con Vehículos Aéreos																		
no Tripulados)	43,8	7		•				•		•	•				•		•	•
Sistemas de Transporte	31,3	5			•							•	•		•		•	
Vehículos Autónomos Inteligentes	37,5	6		•	•				•		•		•		•			
Sistemas Biológicos y Ecológicos																		
Control en Agricultura	6,3	1															•	
Sistemas Biológicos y Médicos	68,8	11	•	•	•	•	•	•			•	•			•		•	•
Modelado y Control de Sistemas Medioambientales	12,5	2	•														•	
Biosistemas y Bioprocesos	37,5	6	•	•	•		•	•									•	
Sistemas Sociales	- 10																	
Sistemas Económicos y de Negocios	12,5	2																•
Impacto Social de la Automatización	0,0	0																
Sistemas en vías de Desarrollo	0,0	0																
Educación en Control	0,0																	
Control Cuántico-molecular	18,8	3		•		•											•	
Sistemas meso-escala (5-100 nm)	0,0	0																
The state of the s	5,0																	

Tabla D.4. Universidades americanas.

IFAC	%	Total	4	10	23	27	48	52	56	66	97	132	154	230
		Total	_	10	23		70	32	30	00]] /	132	134	250
Sistemas y Señales Modelado, Identificación y Procesamiento de Señal	53,8	7			•		•	•		•		•		•
Sistemas Adaptativos y basados en Aprendizaje	30,8	4		•										
Sistemas de Eventos Discretos e Híbridos	38,5	5	•											
Sistemas Estocásticos	23,1	3			•									
Sistemas en Red	30,8	4			•	Ĭ	Ĭ					•		•
Métodos de Diseño	·													
Diseño de Control	23,1	3	•				•					•		
Sistemas de Control Lineales	15,4	2						•				•		
Sistemas de Control No-Lineales	61,5	8			•		•	•	•	•			•	•
Control Óptimo	61,5	8	•		•		•	•	•			•	•	•
Control Robusto	38,5	5			•			•				•	•	•
Computadores, Cognición y Comunicación														
Computadores para Control Inteligencia Computacional en	0,0	0												
Control Computadores, Comunicación y	15,4	2		•									•	
Telemática	0,0	0												
Mecatrónica, Robótica y Componentes														
Componentes y Tecnologías para Control	0,0	0												
Sistemas Mecatrónicos	0,0	0												
Robótica	38,5	5		•					•		•			•
Automatización Orientada a Costes	0,0	0												
Sistemas Persona Máquina	15,4	2							•				•	
Manufactura y Sistemas Logísticos	23,1	3								•			•	•
Control de Plantas de Manufactura	0,0	0												
Modelado de sistemas de Manufactura para Gestión y Control	0,0	0												
Integración Empresarial y Redes	0,0	0												
Sistemas Complejos de Gran Escala	46,2	6	•		•		•	•	•			•		
Sistemas de Potencia y Proceso		_												
Control de Procesos Químicos Minería y Procesado de Minerales	53,8	7		•		•	•			•		•	•	
y Metales Plantas de Potencia y Sistemas de	0,0	0												
Potencia Detección de Fallos, supervisión y	46,2	6			•	•	•	•			•		•	
Seguridad de Procesos Tecnológicos - SAFEPROCESS	23,1	3			•		•			•				
Sistemas de Transporte y Vehículos														
Control de Automoción	69,2	9	•	•	•		•	•			•		•	•
Sistemas Marinos	15,4	2	•		•									
Aeroespacio (con Vehículos Aéreos no Tripulados)	38,5	5	•	•			•	•					•	
Sistemas de Transporte	15,4	2											•	•
Vehículos Autónomos Inteligentes	0,0	0												

IFAC	%	Total	4	10	23	27	48	52	56	66	97	132	154	230
Sistemas Biológicos y Ecológicos														
Control en Agricultura	0,0	0												
Sistemas Biológicos y Médicos	61,5	8	•	•		•	•	•	•	•		•		
Modelado y Control de Sistemas Medioambientales	7,7	1			•									
Biosistemas y Bioprocesos	23,1	3				•					•			
Sistemas Sociales														
Sistemas Económicos y de Negocios	0,0	0												
Impacto Social de la Automatización	0,0	0												
Sistemas en vías de Desarrollo	0,0	0												
Educación en Control	0,0													
Control Cuántico-molecular	0,0	0												
Sistemas meso-escala (5-100 nm)	0,0	0												

Tabla D.5. Universidades europeas.

IFAC	%	Total	22	57	67	76	217
Sistemas y Señales Modelado, Identificación y Procesamiento de Señal Sistemas Adaptativos y basados en Aprendizaje Sistemas de Eventos Discretos e Híbridos Sistemas Estocásticos Sistemas en Red	40,0 20,0 80,0 0,0 40,0	2 1 4 0 2	•	•		•	•
Métodos de Diseño Diseño de Control Sistemas de Control Lineales Sistemas de Control No-Lineales Control Óptimo Control Robusto	40,0 20,0 60,0 80,0 60,0	2 1 3 4 3	•	•	•		•
Computadores, Cognición y Comunicación Computadores para Control Inteligencia Computacional en Control Computadores, Comunicación y Telemática	0,0 20,0 0,0	0 1 0		•			
Mecatrónica, Robótica y Componentes Componentes y Tecnologías para Control Sistemas Mecatrónicos Robótica Automatización Orientada a Costes Sistemas Persona Máquina	0,0 0,0 60,0 0,0 0,0	0 0 3 0		•		•	•
Manufactura y Sistemas Logísticos Control de Plantas de Manufactura Modelado de sistemas de Manufactura para Gestión y Control Integración Empresarial y Redes Sistemas Complejos de Gran Escala	20,0 20,0 20,0 0,0 40,0	1 1 1 0 2		•	•		•
Sistemas de Potencia y Proceso Control de Procesos Químicos Minería y Procesado de Minerales y Metales Plantas de Potencia y Sistemas de Potencia Detección de Fallos, supervisión y Seguridad de Procesos Tecnológicos – SAFEPROCESS	0,0 0,0 0,0	0 0 0		•			

IFAC	%	Total	22	57	67	76	217
Sistemas de Transporte y Vehículos							
Control de Automoción	20,0	1				•	
Sistemas Marinos	0,0	0					
Aeroespacio (con Vehículos Aéreos no Tripulados)	40,0	2			•		•
Sistemas de Transporte	20,0	1				•	
Vehículos Autónomos Inteligentes	0,0	0					
Sistemas Biológicos y Ecológicos							
Control en Agricultura	0,0	0					
Sistemas Biológicos y Médicos	0,0	0					
Modelado y Control de Sistemas Medioambientales	0,0	0					
Biosistemas y Bioprocesos	20,0	1			•		
Sistemas Sociales							
Sistemas Económicos y de Negocios	0,0	0					
Impacto Social de la Automatización	0,0	0					
Sistemas en vías de Desarrollo	0,0	0					
Educación en Control	0,0						
Control Cuántico-molecular	0,0	0					
Sistemas meso-escala (5-100 nm)	20,0	1	•				
Control Cuántico-molecular	0,0	-	•				

Tabla D.6. Universidades asiáticas.

Anexo E

Principales revistas internacionales de control automático

Ref.	Revista	ISSN	País	Editorial
1	Annual reviews in control	1367-5788	EEUU	Elsevier Science Ltd
2	Asian Journal of Control	1561-8625	Taiwán	Chinese Automatic Control soc.
3	Assembly automation	0144-5154	Gran Bretaña	Emeral group publishing limited
4	Automation and Remote control	0005-1179	Rusia	Springer
5	Automatica	0005-1098	EEUU	Elsevier Science Ltd
6	Autonomos agent and multi-agent systems	1387-2532	EEUU	Springer
7	Chemometrics and Intelligent Laboratory systems	0169-7439	Holanda	Elsevier Science Ltd
8	Computers and control engineering	0956-3385	Gran Bretaña	Inst. Engineering Technology - IET
9	Control and Automation	0956-3385	Gran Bretaña	Inst. Engineering Technology - IET
10	Control and cybernetics	0324-8569	Polonia	Polish Acad Sciences systems research inst.
11	Control Engineering	0010-8049	EEUU	Reed Business information us.
12	Control Engineering Practice	0967-0661	Gran Bretaña	Elsevier Science Ltd
13	Discrete events dynamic systems theory and applications	0924-6703	EEUU	Springer
14	Engineering Applications of Artificial Intelligence	0952-1976	Gran Bretaña	Elsevier Science Ltd
15	ESAIM- control optimization and calculus of variation	1262-3377	Francia	EDP Sciences SA
16	European Journal of control	0947-3580	Francia	Lavoisier
17	IEE Procedings - control theory and applications	1350-2379	Gran Bretaña	Inst. Engineering Technology - IET
18	IEEE Control system Magazine	1066-033X	EEUU	IEEE-Inst Electrical Electronics Engineering Inc
19	IEEE Robotics & Automation Magazine	1070-9932	EEUU	IEEE-Inst Electrical Electronics Engineering Inc
20	IEEE Transactions on Automation Science and Engineering	1545-5955	EEUU	IEEE-Inst Electrical Electronics Engineering Inc
21	IEEE Transactions on Automatic Control	0018-9286	EEUU	IEEE-Inst Electrical Electronics Engineering Inc
22	IEEE Transactions on Control Systems Technology	1063-6536	EEUU	IEEE-Inst Electrical Electronics Engineering Inc
23	IEEE Transactions on Industrial Electronics	0278-0046	EEUU	IEEE-Inst Electrical Electronics Engineering Inc
24	IEEE Transactions on Industrial Informatics	1551-3203	EEUU	IEEE-Inst Electrical Electronics Engineering Inc

Ref.	Revista	ISSN	País	Editorial
25	IEEE Transactions on Systems, Man	1083-4419	EEUU	IEEE-Inst Electrical Electronics
26	and Cybernetics. Part B: Cybernetics IEEE ASME Transactions on	1083-4435	EEUU	Engineering Inc IEEE-Inst Electrical Electronics
27	Mecatronics IET Control Theory and Applications	1751-8644	Gran	Engineering Inc Inst. Engineering Technology - IET
	, , , ,		Bretaña	3 3 3
28	Internacional Journal of Adaptive Control and Signal Processing	0890-6327	Gran Bretaña	John Wiley & Sons Ltd.
29	Internacional Journal of Advanced manufaturing technology	0268-3768	Gran Bretaña	Springer London LTD
30	Inrternational Journal of Control	0020-7179	Gran Bretaña	Taylor & Francis, LTD
31	Internacional Journal of Control Automation and Systmes	1598-6446	Corea del Sur	Inst Control Robotics & Systems, Korean Inst Electrical Eng.
32	International Journal of Innovative Computing Information and Control	1349-4198	Japón	ICIC INT
33	International Journal of Robotics & Automation	0826-8185	EEUU	Acta Press /IASTED
34	International Journal of Robust & Nonlinear Control	1049-8923	Gran Bretaña	John Wiley & Sons Ltd.
35	Internacional Journal of Systems Science	0020-7721	Gran Bretaña	Taylor & Francis, LTD
36	Intelligent Automation and Soft Computing	1079-8587	EEUU	AUTOSOFT PRESS
37	Journal of Chemometrics	0886-9383	Gran Bretaña	John Wiley & Sons Ltd.
38	Journal of Dynamical and control systems	1079-2724	EEUU	Springer
39	Journal of Dynamic systems measurement and control - Transactions of the ASME	0022-0434	EEUU	ASME-AMER SOC MECHANICAL ENG
40	Journal of the Franklin Institute- Engineering and applied mathematics	0016-0032	EEUU	Elsevier Science Ltd
41	Journal of machine learning research	1532-4435	EEUU	MICROTOME PUBL
42	Journal of Process Control	0959-1524	Gran Bretaña	Elsevier Science Ltd
43	Journal of Robotics Systems	0741-2223	EEUU	John Wiley & Sons Ltd.
44	Mathematics of control signals and systems	0932-4194	Gran Bretaña	Springer London LTD
45	Measurement & control	0020-2940	Gran Bretaña	Inst. Measurement Control
46	Mechatronics	0957-4158	Gran Bretaña	Elsevier Science Ltd
47	Optimal control applications & methods	0143-2087	Gran Bretaña	John Wiley & Sons Ltd.
48	Proceedings of the institution of mechanical engineering Part I - Journal of Systems and control engineering	0959-6518	Gran Bretaña	Professional Engineering Publishing Ltd
49	Robotics and autonomous systems	0921-8890	Holanda	Elsevier Science Ltd
50	SIAM Journal on Control and Optimization	0363-0129	EEUU	Siam Publications
51	Systems & Control Letters	0167-6911	Holanda	Elsevier Science Ltd
52	Transactions of the Institute of Measurement and Control	0142-3312	Gran Bretaña	Sage Publications Ltd

Anexo F

Breve reseña histórica

Como ya se ha comentado a lo largo de este libro, el control automático se ha consolidado como una disciplina independiente en apenas 70 años y con unas características de disciplina transversal aplicable en muchos ámbitos del conocimiento, desde la formulación más clásica aplicable a las diferentes ramas de las ingenierías, pasando por la economía e incluso en las ciencias sociales. Esta característica conforma hoy en día al control automático como una disciplina autónoma, de asociación clara con las matemáticas aplicadas y, desde el advenimiento de los computadores, con la algorítmica.

Este anexo está dedicado a describir brevemente la historia del control automático mediante la descripción de los hitos más destacados que han contribuido al avance de esta disciplina. Además se ha considerado interesante que este anexo podría servir también para informar a la comunidad (docente, investigadora, empresarial, etc.) de cómo se ha ido organizando la automática en general y dentro de ella el control automático a nivel nacional e internacional. La información del nacimiento, evolución y consolidación de los foros donde se ha ido desarrollando la automática y el control automático es un punto de partida para la mejor compresión de alguno de los puntos de este Libro Blanco del Control Automático.

F.1. El periodo inicial

Aunque el origen de los principios de la realimentación y, por tanto del control automático, se remontan a hace más de 4000 años, no es hasta el siglo XVIII cuando se patentan los primeros dispositivos con realimentación para mantener orientados los molinos de viento y también para mantener constante su velocidad.

El primer dispositivo que se puede tomar como punto de partida del control automático es el regulador centrífugo de Watt que regulaba la velocidad de las máquinas de vapor. Si los primeros reguladores de Watt funcionaban satisfactoriamente gracias al considerable rozamiento presente en sus mecanismos, cuando en el siglo XIX cambiaron las técnicas de diseño de las máquinas y se mejoró el proceso de fabricación se observó el fenómeno de la oscilación periódica de la velocidad. El problema era tan importante que atrajo a un número importante de científicos para su resolución. En 1868 Maxwell resuelve el problema y en su famoso trabajo «On governors» desentraña los conceptos de estabilidad de sistemas cuando descubre que un sistema en torno a su punto de equilibrio puede describirse de forma aproximada por una ecuación diferencial lineal y analizar su estabilidad mediante el cálculo de las raíces de su ecuación algebraica característica. La importancia fundamental del trabajo de Maxwell radica en la asociación del problema físico de la estabilidad de un sistema o dispositivo con su resolución mediante técnicas puramente matemáticas. No obstante, es Routh en 1877 el que da la solución general al problema de la determinación de la estabilidad de un sistema.

No puede pasar desapercibida la importancia que adquirió el control automático durante finales del siglo XIX y comienzos del XX cuando en 1912 se concede el premio Nobel de Física al sueco Dalen por el diseño de reguladores utilizados conjuntamente con los acumuladores de gas para balizas luminosas. Son de destacar también, ya bien entrado el siglo XX, en 1920, algunos trabajos matemáticos debidos a Minorsky sobre el control del rumbo de barcos, en donde se proponía la utilización de un controlador PID.

En los años treinta surge otro trabajo clásico en automática, el debido a Nyquist, en el dominio de la frecuencia, esta vez de la mano de la resolución de problemas de telefonía a gran distancia, el cual en 1932 presenta su trabajo sobre estabilidad de amplificadores realimentados. Si unimos el nombre de Nyquist al de Black y Bode es posible explicar el avance del control automático para garantizar satisfactoriamente el comportamiento de un sistema en bucle cerrado incluso ante un conocimiento deficiente del mismo.

En 1940 y 1950, Wiener realizó una serie de aportaciones en la teoría de control que bajo el término de «cibernética», (término que significa gobierno) permitieron tratar los problemas de comunicación y control de una manera unificada. Wiener también desarrolló un método para el filtrado y predicción de señales en presencia de ruido. Subsecuentes desarrollos hicieron uso de un área emergente, la de procesos estocásticos estacionarios utilizados en las nuevas aportaciones de Bode-Shannon.

Son muchas las aplicaciones prácticas del control automático hasta la finalización de la Segunda Guerra Mundial: sistemas de posicionamiento de ejes, máquinas de control hidráulicas, control de turbinas, sistemas de control neumáticos para plantas químicas y de proceso, etc. Es en estos controladores neumáticos donde nace realmente el controlador PID de 3 términos.

El impulso tecnológico dado al control automático hasta los años 30 trajo consigo la fundación de numerosas empresas dedicadas a resolver problemas de automatización en

las industrias. Algunas de ellas continúan en nuestros días a la cabeza del desarrollo de dispositivos derivados de las metodologías desarrolladas en el ámbito del control automático. Podríamos citar, entre otras, a Honeywell, Foxboro y Fisher & Porter.

Mención especial debe hacerse del trabajo de Ziegler y Nichols que en 1942 propusieron su famoso criterio para la sintonización de PIDs. Ese mismo año Harris realizó una contribución fundamental para extender el ámbito del dominio frecuencial a otros campos de la ingeniería a través de diagramas de bloques.

Durante la funesta Segunda Guerra Mundial el control automático se puso al servicio del desarrollo de cada vez más potentes y mortíferas armas para resolver problemas como el de control de tiro, que cada vez requería mayor velocidad y precisión. Fueron los trabajos de Bode y Nyquist los que contribuyeron especialmente a la sistematización en el diseño controladores. También el control automático contribuyó, desafortunadamente, al control del proceso de producción de uranio para el diseño de la bomba atómica y al problema de detección y seguimiento de blancos mediante un radar, que recibe datos de forma intermitente, que propició el inicio de la teoría de los sistemas muestreados.

Se va a terminar este punto hablando del diseño de sistemas de control para aviones. Aunque ya desde principios de siglo se advertían las relaciones entre la dinámica de los aviones y la teoría del control automático, no fue hasta mediados de los 50 cuando se concibió el diseño de autopilotos basados en modelos linealizados. Hoy en día la conexión entre dinámica y control ha permitido acuñar un nuevo término, el «diseño y control integrado de procesos», de manera que no se diseña un controlador para un proceso ya existente sino que se diseñan conjuntamente el proceso y el controlador. Este hecho ayuda significativamente a mejorar las prestaciones del sistema conjunto al conseguir mayores grados de libertad en el comportamiento del sistema. Esta idea utilizada en los aviones se ha ido extendiendo a otros ámbitos de la ingeniería.

F.2. El periodo moderno y de la diversificación

Todo el bagaje teórico-práctico adquirido por el control automático durante la Segunda Guerra Mundial pudo servir también, afortunadamente, para resolver problemas para la paz. Este periodo de guerra y el inmediatamente posterior sirvieron para dar un nuevo impulso matemático en este ámbito y nuevas teorías de control automático comenzaron a formularse dando lugar a embriones que fueron la base de nuevos dispositivos físicos de control en los años siguientes.

Antes de los años cincuenta el ámbito del control automático estaba dominado por técnicas en el dominio de la frecuencia o de la transformada de Fourier. Entre otros se

podrían citar los trabajos de Krylov y Bogoliubov (1943) con su interesante extensión del diagrama de Nyquist mediante la función descriptora para el análisis de los sistemas no lineales. Pero ya empezaban a plantearse nuevos enfoques más basados en el dominio temporal o de la transformada de Laplace. Hay que hacer mención especial del trabajo de Evans (1948) que formuló su conocidísimo método del lugar de las raíces y que tanto ha contribuido al avance del control automático.

Pero una vez llegado a los años 50, la irrupción del computador como elemento de cálculo fue el verdadero impulsor de otra gran revolución en el campo del control automático, de nuevo apoyándose en las matemáticas. Además, la carrera espacial contribu-yó a poner encima de la mesa un problema práctico que necesitaba soluciones a los nuevos retos planteados, fundamentalmente conducentes a dar respuesta a problemas de optimización como cálculo de trayectorias óptimas, solución a problemas para consumo mínimo, etc.

Uno de los trabajos que sobre control óptimo aparecen en dichos años corresponde a Bellman (1957) motivadas por el problema de decisión estadística óptima para planificación de recursos. Su contribución conceptual fue considerar una familia de problemas de optimización dinámica parametrizados por sus estados iniciales. La pieza central fue la ecuación de programación dinámica para comportamiento óptimo, solución en la que se determinaba una ley de control óptima por realimentación.

Otra área de la optimización que comenzó en el mismo periodo, se centraba en las restricciones de desigualdad, las cuales habían sido olvidadas hasta entonces. Los investigadores en esta área tomaron la delantera en concebir métodos numéricos orientados a su resolución mediante un computador, aproximación que se ha vuelto sustancial en control.

Los ingenieros soviéticos en 1950 expresaron su interés en los transitorios en los cuales las no linealidades, efectos de saturación y limitaciones en el control no podían ser ignorados. Conversaciones entre estos ingenieros y matemáticos del *Steklov Institute* en Moscú condujeron al descubrimiento del principio del máximo de Pontryagin para la determinación de la trayectoria óptima de un sistema. El principio del máximo abrió la puerta al estudio sistemático de las trayectorias óptimas con funciones discontinuas de control en presencia de restricciones tanto en el estado como en la señal de control. Estos estudios tienen una conexión profunda con el cálculo variacional, y estimuló subsecuentes estudios teóricos en problemas abstractos de optimización. Quizá la más significativa contribución en esta teoría fue en 1969, tras una gran investigación en métodos numéricos de cálculo de trayectorias óptimas, que permitió incorporarlos en los computadores de las misiones espaciales (inicialmente en la misión Apolo y posteriormente en los trasbordadores espaciales de la NASA).

Dentro de este contexto relativo al dominio temporal hay que destacar también los avances en estos años de los problemas del análisis de estabilidad de ecuaciones diferenciales lineales y no lineales a través de los métodos originales de Lyapunov (1892) y aplicado en el contexto de control automático por Poincaré.

Otro hito en la teoría de control apareció en 1960 con el desarrollo del filtro de Kalman (o Kalman-Bucy). Las teorías iniciales de Wiener de diseño de filtros estaban limitadas por asunciones tales como la suposición estacionaria de los procesos estocásticos y además se necesitaba para su resolución resolver una ecuación integral o factorizar una transformada de Fourier. El filtro de Kalman estaba libre de estos inconvenientes y podía ser implementado como un algoritmo secuencial en un pequeño computador. Su diseño permitió resolver una nueva ecuación, la ecuación matricial de Riccati. Por el principio de dualidad se pudo diseñar un controlador por realimentación lineal del estado diseñado para ser descrito con ecuaciones del mismo tipo. Estas ideas tuvieron gran impacto en el mundo y han estimulado a un gran número de investigadores en la teoría de control y filtrado, conduciendo a múltiples aplicaciones de la teoría de control. Un algoritmo basado en el filtro de Kalman fue implementado en un computador a bordo del Apolo y usado para corregir trayectorias en misiones espaciales.

Estos éxitos de la teoría de control atrajeron a nuevos investigadores, incluyendo a matemáticos más teóricos fascinados por las oportunidades de investigación asociadas.

Con todas estas herramientas, la teoría creció y se volvió diversa como si fuera una «Torre de Babel» (fenómeno que se entiende como el de especialistas en una rama que pueden tener dificultades en entender el trabajo de expertos en otra muy afín). Sin embargo, hasta nuestros días el regulador lineal cuadrático, teoría postulada por Kalman ha jugado un papel fundamental y universal accesible a todas las ramas antes mencionadas.

La teoría de sistemas lineales ha sido muy vigorosa durante los últimos 50 años. Con la introducción de los conceptos de controlabilidad, observabilidad, formas canónicas, realización del espacio de estados y del problema del regulador lineal cuadrático gaussiano. Esta teoría sirve como modelo para la generalización de sistemas de parámetros distribuidos y no lineales y es la base de los nuevos paradigmas del control. Relacionado con estas ideas hay importantes trabajos sobre análisis numérico de problemas de control lineal, los cuales tienen conexión con el algebra numérica lineal. Hace algunos años ya muchos algoritmos de teoría de control avanzado han sido incorporados en varios paquetes de software comercial para computadores de todo tipo.

El campo de la probabilidad ha contribuido sustancialmente a la teoría de control estocástico y filtrado. Trabajos de filtrado no lineal han continuado los trabajos originales del filtro del Kalman e inyectado muchas nuevas ideas. El problema aún no se ha

resuelto en una forma completa y general y continúa presentándose como un reto. La versión estocástica de los problemas de control óptimo generó mucho interés entre los matemáticos en los 70 y 80. En esta área existe una gran actividad y tiene conexiones con el análisis estocástico. En el ámbito de las aplicaciones, la herramienta conceptual de la teoría de control estocástico empezó a jugar un importante papel en el control de sistemas interconectados de potencia.

Una mención especial debe hacerse a los sistemas adaptativos de control que en un amplio rango de tiempo entre los 60 y llegando a los 80 contribuyeron al desarrollo de controladores adaptativos conocidos por MRAS (Control Adaptativo por Modelo de Referencia) y STR (Regulador Autosintonizado). Los primeros desarrollados en el dominio temporal continuo haciendo uso de las conocidas reglas del MIT o basados en la teoría de Lyapunov, pero no han tenido una gran aceptación como hubiera cabido esperar. Si lo han tenido las técnicas STR que enfocadas en el dominio de tiempo discreto y en colaboración con las técnicas de identificación paramétrica han constituido, sin el formalismo matemático de los MRAS, una fuente muy importante de aplicaciones prácticas industriales.

Al final de los 70 y principio de los 80, el diseño de sistemas de control realimentado empezó a sufrir una profunda revisión. Después de muchos años en los cuales los métodos de espacio de estados basados en ecuaciones diferenciales prevalecían, los diseños basados en el dominio de la frecuencia vuelven a estar presentes. Esta aproximación aparece apropiada para el estudio de control robusto, puesto que permite la parametrización de todos los controladores estabilizantes y la selección de uno cuyo comportamiento es uniformemente deseable para todas las frecuencias.

La conexión con la ciencia de los computadores ha comenzado a jugar un papel en el desarrollo de la inteligencia artificial y la introducción de nuevas arquitecturas de computadores. Mención especial requieren los sistemas expertos diseñados para automatizar las soluciones teóricas y numéricas de problemas de optimización estocástica. Trabajos en la integración de computación simbólica y numérica en el contexto del control han tenido un desarrollo muy interesante. El concepto de control inteligente actualmente está bien desarrollado y entre sus objetivos está el alcanzar una mezcla de la teoría de control actual con la problemática de la inteligencia artificial. Los sistemas de eventos discretos prevén una conexión con la teoría de las máquinas de estados extendida y hoy en día proveen herramientas de modelado para la evaluación del comportamiento de los sistemas de computadores.

F.3. El control automático hoy

Como se ha comentado antes, hoy por hoy la diversificación hace que el área del control automático sea un campo fructífero y potente donde son numerosas las líneas de investigación que se pueden seguir, pero también es verdad que es difícil en muchas ocasiones que los especialistas en uno de estos ámbitos se aproximen a las de sus vecinos. El desconocimiento global del desarrollo del control automático, es una fuente de pérdida de oportunidades y sinergias.

En este apartado se hace un repaso somero de aquellas ideas más importantes que bajo el paraguas de control automático están hoy en día más en boga. No se trata de hacer ni un análisis exhaustivo ni profundo de estos subcampos, sino descriptivo y orientativo por las razones antes mencionadas.

En el ámbito de la identificación se aprecia actualmente un interés notable en la sintonía de modelos basados en primeros principios que explican de forma más cercana al área de aplicación concreta, los fenómenos físicos, químicos, biológicos, etc. Las modernas técnicas de optimización estocástica (algoritmos genéticos, simulated annealing, colonia de hormigas, etc.) permiten la sintonía de los parámetros de dichos modelos.

En el ámbito de la teoría de sistemas existe una atención creciente hacia los sistemas dinámicos de eventos discretos de naturaleza híbrida donde la naturaleza discreta conducida por eventos introduce el comportamiento dinámico continuo diferenciado en cada uno de los estados del sistema entre los que va evolucionando.

En el ámbito del diseño de sistemas de control el interés es muy variado. La consideración de la presencia de perturbaciones y de la incertidumbre en la definición del modelo del proceso ha focalizado el interés de los investigadores en el diseño de controladores robustos bajo diferentes enfoques H-infinito, H₁, H₂, LMI, etc.

Otro ámbito que actualmente está muy presente es el diseño de controladores predictivos, herederos del controlador LQR debido a Kalman, pero donde no se requiere un modelo preciso para su aplicación. Los controladores predictivos están basados en la predicción del comportamiento futuro del sistema mediante un modelo que predice lo que ocurriría más allá del instante actual en un horizonte de predicción dado. Los diseños del tipo DMC, QDMC, GPC, y variantes no lineales de los mismos están teniendo un interés creciente, puesto que su formulación en base a la optimización de un índice de coste permite una gran versatilidad a la hora de formular diferentes estrategias que van más allá de la clásica formulación cuadráticas de los índices.

En el ámbito de la computación y la simulación es importante destacar el énfasis que se ha puesto en los aspectos numéricos que son tan importantes para el análisis e imple-

mentación de los sistemas de control. Los recientes simposios sobre ingeniería de control asistida por computador así lo testifican. Ha tenido mucho que ver en esto la aparición de *software* para el cálculo matricial y simbólico.

Finalizamos aquí este apartado, con la seguridad de que probablemente cuando sea leído por miembros de la comunidad de control automático alguien echará en falta la presencia de su campo específico de aplicación. Ya desde aquí pedimos disculpas por ello, pero se ha querido dar una visión no exhaustiva del campo, más generalista y divulgativa entendiendo que los potenciales consumidores de este texto van más allá de los miembros de la comunidad del control automático en España y que por razones lógicas era necesaria esta síntesis.

11

Autores y colaboradores

Autores

Pedro Albertos Pérez (Universidad Politécnica de Valencia)

Alejandro Alonso Muñoz (Universidad Politécnica de Madrid)

Jordi Ayza Graells (Universitat Politècnica de Catalunya)

Sebastián Dormido Bencomo (Universidad Nacional de Educación a Distancia)

Víctor Etxebarría Ecenarro (Universidad del País Vasco)

Maria Jesús de la Fuente Aparicio (Universidad de Valladolid)

Ramón Galán López (Universidad Politécnica de Madrid)

Francisco Gordillo Álvarez (Universidad de Sevilla). Coordinador

Miguel Andrés Martínez Iranzo (Universidad Politécnica de Valencia)

Cesar de Prada Moraga (Universidad de Valladolid)

Joseba Quevedo Casín (Universitat Politècnica de Catalunya)

Carlos Sagües Blázquiz (Universidad de Zaragoza)

Matilde Santos Peñas (Universidad Complutense de Madrid)

Colaboradores

Rosa Aguilar Chinea (Universidad de La Laguna)

Héctor Manuel Becerra Fermín (Universidad de Zaragoza)

Manuel Berenguel Soria (Universidad de Almería)

Jesús Manuel de la Cruz García (Universidad Complutense de Madrid)

Eduardo Fernández Camacho (Universidad de Sevilla)

Agustín Jiménez Avello (Universidad Politécnica de Madrid)

Gonzalo López Nicolás (Universidad de Zaragoza)

Manuel Gil Ortega Linares (Universidad de Sevilla)

Francisco Salas Gómez (Universidad de Sevilla)

Relación de autores de las fotografías de este libro

Nicolás Pérez, Alan Radecki, Walter Siegmund, Roberto Uderio, Julian Herzog, GB Power Tech GmbH, Frank Vincentz. Rosco, Myrabella, Nachoman-au, kjkolb, Rockershirt, jepoycamboy, Peter17, MorganaF1 en Creative Commons.





