

TRONCALIDAD DE ISA EN EL NUEVO PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA INDUSTRIAL DE LA UNIVERSIDAD DE OVIEDO

Ignacio Díaz Blanco Guillermo Ojea Merín
idiaz@isa.uniovi.es gojea@isa.uniovi.es

Área de Ingeniería de Sistemas y Automática
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, de Computadores y Sistemas
Universidad de Oviedo

15 de marzo de 2004

Resumen

En este trabajo se exponen los contenidos curriculares de la docencia troncal de Ingeniería de Sistemas y Automática en el marco del plan de estudios de la titulación Ingeniería Industrial aprobado en 2001, de cinco años. El cambio de estructura y la reducción en créditos que supone este plan respecto a los planes antiguos de seis años, así como las nuevas tendencias a nivel mundial en la educación en control sugieren un enfoque más práctico, en el que se han incluido elementos poco habituales en la docencia clásica del control, como las funciones de sensibilidad, o el teorema de Bode, y donde, siguiendo las recomendaciones de [1], se otorga un mayor protagonismo a aspectos prácticos tales como la metodología de diseño, los aspectos tecnológicos del control, sus limitaciones fundamentales, o las arquitecturas de control, frente a otros elementos más mecánicos o rutinarios (reglas de trazado del Bode o del Lugar de las Raíces, criterio de Routh) que permiten un enfoque más orientado en el uso del computador.

Palabras clave: Aspectos curriculares del control, educación en control, metodologías, contenidos troncales

1 INTRODUCCIÓN

Las materias o asignaturas troncales constituyen los contenidos que deben impartirse en todos los planes de estudios de una misma titulación, sea cual sea la Universidad en la que se estudie, y son obligatorias para la Universidad y para el alumno. A la hora de planificar un contenido para las asignaturas troncales de ISA en un plan de estudios de Ingeniería Industrial deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

- *Contenido de mínimos.* Las asignaturas troncales deben reunir los conceptos y conocimientos

básicos para la formación del ingeniero industrial. Sus contenidos han de ser, pues, los mínimos exigibles para un ingeniero industrial, sea cual sea su especialización.

- *Punto de partida para la intensificación.* El contenido de estas asignaturas debe, además, servir como punto de partida para el resto de las asignaturas optativas de la intensificación en Electrónica y Automática.
- *Conocimientos llave.* Finalmente, las troncales deben proveer al alumno de los conocimientos necesarios en otras asignaturas del plan de estudios, como es el caso de las de Electrónica.

De forma transversal a los tres aspectos anteriores, las materias troncales deben guardar un adecuado equilibrio en tres ámbitos esenciales:

- *Principios.* El ingeniero industrial debe tener una mínima pero sólida formación en los principios básicos del control. Los fundamentos del control y la teoría de sistemas, le permitirán desenvolverse en un escenario en el que los principios del control están presentes de forma masiva tanto en la propia naturaleza de muchos sistemas y procesos (químicos, mecánicos, electrónicos, biológicos, socioeconómicos, ...) como introducidos de forma deliberada y dirigida, constituyendo una pieza esencial y crítica en muchos ingenios tecnológicos [6].
- *Métodos.* En la mayoría de los problemas industriales el ingeniero de control se enfrenta a menudo a escenarios en los que el problema está poco o mal definido, los objetivos son poco claros y en ocasiones contradictorios y la información disponible, o es excesiva o es imprecisa. El ingeniero de control debe saber moverse entre aproximaciones, aplicar sentido común y conocer las consecuencias

de cada elección, aplicando una adecuada metodología de diseño que le permita obtener la configuración, especificaciones así como identificar los parámetros clave para un sistema propuesto que alcance los objetivos propuestos [3], yendo desde el conocimiento del problema hasta la fase de test y explotación, empleando con eficiencia las técnicas de diseño, análisis, simulación y elección de la tecnología.

- **Tecnologías.** Las piezas con las que se trabaja en la ingeniería de control son elementos tecnológicos que distan de ser ideales. El alumno debe conocer los aspectos más importantes relacionados con las tecnologías de los elementos que integran la cadena de control así como las limitaciones que éstos imponen y su impacto en el rendimiento del sistema de control.

2 ESTRUCTURA DEL PLAN DE ESTUDIOS DE 2001

En el plan de estudios aprobado en 2001 para la titulación de Ingeniería Industrial en la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Gijón de la Universidad de Oviedo existen dos asignaturas troncales pertenecientes al Área ISA: Análisis Dinámico de Sistemas (2º curso, 3T+1.5P) y Sistemas Automáticos (4º curso, 3T+3P), no existiendo asignaturas obligatorias. En la figura 1 se muestra una radiografía de la situación de la docencia de ISA en dicho plan de estudios.

3 CONTENIDOS TRONCALES DE ISA EN EL PLAN DE 2001

La planificación de los contenidos de las asignaturas troncales de ISA debe ser el resultado de un adecuado compromiso entre estos aspectos y el (limitado) tiempo asignado para ellas en el plan de estudios, lo que obligará, sin duda, a optar entre materias esenciales. En virtud de estas consideraciones entendemos que se deben abordar principalmente los siguientes temas:

Modelado y simulación de sistemas
 Análisis temporal y frecuencial de sistemas continuos
 Análisis dinámico de sistemas realimentados
 Metodología de diseño de sistemas de control
 Fundamentos del control
 Técnicas de análisis y evaluación de sistemas de control
 Técnicas de diseño de reguladores
 Control digital (discretización de reguladores)
 Aspectos tecnológicos del control
 Introducción a la automatización industrial
 Arquitectura de PLC's y nociones de programación

Tabla 1: Contenidos mínimos en las troncales de ISA

Modelado y simulación de sistemas. Un ingeniero industrial debe saber obtener las ecuaciones de un sistema físico, linealizarlas, expresarlas mediante *funciones de transferencia* y a partir de ellas resolverlas o determinar sus características esenciales como la velocidad y tipo de respuesta o la estabilidad. Debe conocer, además, la *descripción en espacio de estados*, que provee una generalización a sistemas multivariable y aporta importantes conceptos como el propio concepto de estado, la controlabilidad y la observabilidad. Debe, asimismo, adquirir un *enfoque sistémico*, saber describir un sistema o proceso propio de la Ingeniería mediante *diagramas estructurales* y *diagramas de bloques* que le den una visión de conjunto y que le permitan introducirlo en *herramientas de simulación*, en las cuales podrá incorporar fácilmente elementos no lineales y someterlo a condiciones más próximas a la realidad. La simulación le permitirá tanto evaluar el diseño de sistemas (no sólo de control) en condiciones más próximas a la realidad, como ajustar dicho diseño en función de éstas.

Análisis temporal y frecuencial de sistemas continuos. El ingeniero industrial debe, además, conocer los principios básicos de la dinámica de los sistemas lineales. Conceptos como constante de tiempo, ganancia, sobreoscilación, sistemas sub y sobreamortiguados, etc., así como los de respuesta en frecuencia, ancho de banda, filtro, etc. son imprescindibles en su bagaje técnico y deberá recurrir a ellos, no sólo en disciplinas vinculadas a la Electrónica sino también en Mecánica, Ingeniería Eléctrica y Construcción, por citar algunas. Asimismo, éstos son básicos en asignaturas como Electrónica Analógica (optativa de 3º) o Sistemas Electrónicos (troncal de 4º, primer cuatrimestre).

Análisis dinámico de sistemas realimentados. Los sistemas realimentados constituyen un caso especial de sistemas dinámicos, exhibiendo un comportamiento específico que no resulta en absoluto obvio. En Ingeniería muchos sistemas obedecen a principios de realimentación, tanto por su propio diseño como por su naturaleza, que el ingeniero debe conocer. Un ingeniero industrial debe, por tanto, conocer estos principios básicos, entre ellos la modificación de la dinámica y los efectos en la estabilidad que se derivan de la realimentación. En particular, por la estructura curricular del plan, se requiere incluir ya en 2º curso las nociones básicas de realimentación y concretamente un tratamiento algo más detallado de la estabilidad por métodos frecuenciales (criterio de Nyquist), que conduce a los conceptos de *margen de ganancia* y *margen de fase*, necesarios en las asignaturas de Electrónica de tercer y cuarto curso y base de las técnicas de compensación en frecuencia que el alumno verá en Sistemas Automáticos de cuarto curso.



ISA en el Plan de Estudios de Ingeniería Industrial (2001)

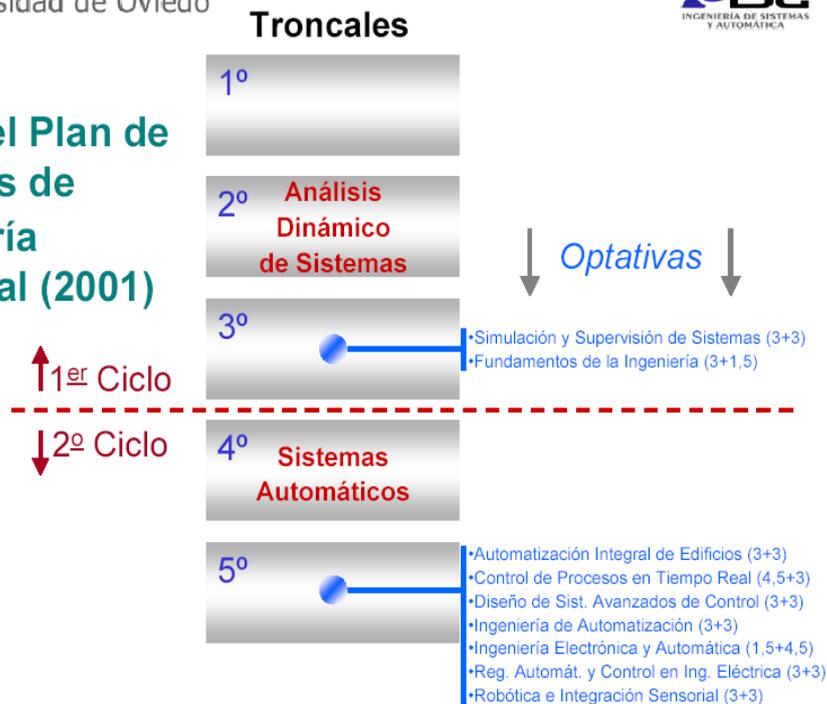


Figura 1: Situación de las asignaturas de ISA en el Plan de Estudios de 2001 de Ingeniería Industrial en la Universidad de Oviedo

Metodología de diseño de sistemas de control. El método de diseño es esencial en la formación del ingeniero industrial. El campo del control encarna muchos de los elementos propios de la esencia de la Ingeniería. Se trata de un campo multidisciplinar en el que durante el diseño deben considerarse factores tecnológicos y económicos, entre otros, en el que el ingeniero debe integrar elementos físicos y tecnológicos muy diferentes, y en el que tanto los datos de partida como los objetivos o especificaciones son, en sí mismos, problemas a resolver que requieren el uso del ingenio y el sentido común. El procedimiento de diseño de sistemas de control es, en su esencia, aplicable en otras ramas de la Ingeniería y brinda al alumno un valiosísimo *saber hacer* que constituirá en su desempeño profesional un activo destacado respecto a otros conocimientos más específicos de la carrera.

Fundamentos del control. La realimentación es una idea muy potente que es utilizada extensivamente tanto en sistemas naturales como artificiales y que en ocasiones ha derivado en avances tecnológicos revolucionarios. Los principios de la realimentación no son patrimonio exclusivo del diseño de sistemas de control, sino que deben ser ya considerados desde el propio diseño del proceso [2]. A menudo, pequeñas modificaciones en el diseño del proceso pueden llevar a enormes diferencias en su desempeño. El conocer los *principios básicos* de la realimentación así como sus *ventajas* y

limitaciones constituye, por tanto, un aspecto esencial en todas las ramas de la Ingeniería. En este sentido, el alumno debe conocer los elementos del *lazo básico* de control y el efecto de la realimentación en cuanto al seguimiento de referencias (errores), rechazo a perturbaciones, robustez ante cambios en los parámetros, mejora en la dinámica y estabilidad.

Técnicas de análisis y evaluación de sistemas de control. Las técnicas de análisis y evaluación son los *ojos* en el proceso de diseño de un sistema de control. A través de ellas, el ingeniero corrige su diseño para alcanzar las especificaciones. En este aspecto, aparte de las técnicas de simulación, deben incluirse las *funciones de sensibilidad*. Estas funciones, especialmente mediante su representación frecuencial, aportan información sobre el desempeño del sistema en sus aspectos fundamentales tales como seguimiento de referencias, acción de control, respuesta a perturbaciones, estabilidad y robustez ante incertidumbres en el proceso. El *lugar de las raíces* aporta también información valiosa sobre el desempeño del controlador, indicando cómo se disponen los polos en el plano S en función de un parámetro. Asimismo, la propia representación frecuencial (diagrama de Bode) de la función de transferencia en bucle abierto aporta abundante información sobre sistema realimentado en relación con el ancho de banda, la estabilidad relativa o la oscilación, entre otras. Todas ellas pueden visualizarse de forma inter-

activa mediante herramientas computacionales, constituyendo su uso conjunto un verdadero catalizador en el proceso de diseño.

Técnicas de diseño de reguladores. Las técnicas de diseño proveen métodos para generar reguladores que cumplan ciertas especificaciones. El problema del control requiere tener en cuenta muchos factores, y las técnicas de diseño aportan visiones concretas. Se propone aquí incluir las técnicas más habituales en cursos de control básicos tales como las basadas en el *lugar de las raíces* y las de *compensación en frecuencia*, considerando otras de carácter empírico como *Ziegler-Nichols* que permiten ajustes cuando se conoce poco sobre el proceso. Es muy importante enfatizar aquí el uso combinado de todas ellas junto con las de análisis y evaluación, lo que aporta un enfoque global en el diseño [4]. Asimismo, el alumno debe conocer las principales *arquitecturas de control*, que permiten resolver problemas específicos (ej. tratamiento de perturbaciones medibles, linealización por realimentación, etc.) y adecuar el diseño a las especificaciones.

Control digital (discretización de reguladores). Cada vez más, hoy en día, las implementaciones de reguladores se realizan mediante sistemas basados en procesadores (computadores industriales, microcontroladores, DSP's, etc.). El control digital es un campo muy amplio que, en nuestra opinión, no puede ser tratado con la profundidad requerida en el tiempo asignado a las troncales. No obstante, la obtención de reguladores digitales por discretización de reguladores continuos es una técnica sencilla y de uso habitual en la industria, que funciona bastante bien si los periodos de muestreo son adecuados. Desde el punto de vista docente, requiere una *introducción a los sistemas discretos*, una descripción de los principales *métodos de discretización* (Euler, Tustin) y, por supuesto, considerar los *efectos de la discretización* en el desempeño del sistema (elección y efecto del período de muestreo, aliasing, cuantificación, etc.).

Aspectos tecnológicos del control. La implementación de un sistema de control requiere el uso de dispositivos tecnológicos que casi nunca son ideales. Los sensores no son instantáneos ni precisos, los actuadores a menudo tienen saturaciones o retardos puros que pueden provocar *wind-up* o inestabilidades, en control digital existen problemas de cuantificación, aliasing y retardo puro de los bloqueadores... El ingeniero debe conocer estos efectos en el sistema de control y saber identificarlos y remediarlos cuando sea posible, bien mediante el diseño o bien mediante la elección adecuada de la tecnología, conjugando precio y prestaciones. En este aspecto, resulta de gran utilidad el *Teorema de Bode*, comparable en Control al teorema de Shannon en

Teoría de la Señal (cfr. glosa de Astrom a [7]), que impone una serie de restricciones en la geometría de la función de sensibilidad que explican las limitaciones fundamentales del control, incluidas las derivadas del ancho de banda limitado por los elementos tecnológicos que integran los sensores, actuadores o el propio proceso.

Introducción a la automatización industrial. Los sistemas de control forman a menudo parte de una red de automatización industrial en la que existen diversos niveles que obedecen a una jerarquía de control. El ingeniero debe conocer, aunque sea a nivel descriptivo, los elementos más importantes que componen esta red, tales como los reguladores industriales, los autómatas programables (PLC's) y los PC's industriales, además de otros elementos específicos como los microcontroladores, microprocesadores y DSP's. Todos estos sistemas están habitualmente conectados mediante buses de campo o redes de comunicación industriales. Asimismo, debe conocer los sistemas de supervisión y control SCADA, en los que se centraliza la información de planta y permiten visualizarla y realizar tareas de control a un nivel superior.

Arquitectura de PLC's y nociones de programación. El autómata programable industrial (API, ó PLC en inglés) es un elemento esencial en la automatización industrial. Se trata de un elemento versátil, modular y robusto, especialmente diseñado para trabajar en entorno industrial, inicialmente pensado para realizar control secuencial, pero que actualmente incorpora módulos E/S analógicos, módulos de control PID además de módulos de comunicaciones (buses de campo, Ethernet, TCP/IP), que le confieren una gran versatilidad para la automatización y la supervisión remota. Aunque un estudio detallado de la programación y aplicaciones de los PLC's requeriría muchas horas, el alumno puede obtener un conocimiento básico que *qué es, qué hace y cómo se trabaja con él* a base de haber programado ejemplos sencillos en prácticas y dedicando un tema teórico a describir su arquitectura y funcionamiento. El alumno puede encontrar un tratamiento más exhaustivo de los autómatas y sus aplicaciones en asignaturas de la especialidad como Ingeniería de Automatización y Automatización Integral de Edificios, ambas optativas de 5º curso.

4 PRÁCTICAS

Otro aspecto relevante que caracteriza las asignaturas de las nuevas titulaciones reside en el cambio significativo que suponen en la proporción entre horas de teoría y horas de prácticas. En las asignaturas de Análisis Dinámico de Sistemas y Sistemas Automáticos, por ejemplo, esta proporción llega hasta hasta el 50%

(3T+3P) para ésta última. Así, en el conjunto de ambas asignaturas troncales, que constituirían aproximadamente el equivalente a una “Regulación Automática I” de los planes antiguos, se dispone de un total de 6 créditos de teoría y 4.5 créditos de prácticas.

Esta situación sugiere considerar la distribución de los contenidos entre las clases teóricas y las prácticas. El control, especialmente en Ingeniería –y más concretamente en un nivel básico como en una troncal–, es una materia que requiere un fuerte enfoque práctico. Muchos de los temas propios del control pueden ser impartidos sin problemas en el contexto de prácticas de laboratorio o simulación. Aunque sería muy largo incluir todos los detalles, cabe sugerir algunos de los aspectos en control que podrían ser explicados, en su mayor parte, en el aula de prácticas, alternando la pizarra con las posibilidades que ofrece la simulación o bien a través de la experimentación:

Simulación/Experimentación

Fundamentos de simulación
Muestreo y Aliasing
Concepto y ventajas de la realimentación
Metodología de diseño de reguladores (LR+Frec)
Métodos empíricos de sint. de regul. (Ziegler-Nichols)
Arquitecturas de control (cascada, FF, etc.)
No-linealidades (wind-up, ciclos límite, etc.)
Programación básica de PLC's

Visitas Lab./Empresa

Automatización Industrial (generalidades y estructura)
Sensores y actuadores

Tabla 2: Algunos de los temas que pueden ser explicados en prácticas.

Por supuesto, esas son sólo sugerencias. Otros muchos temas admiten casi con toda seguridad, enfoques similares y con una adecuada planificación pueden ser impartidos completamente en el aula de prácticas.

5 REPARTO DE LOS CONTENIDOS TRONCALES ENTRE 2º Y 4º

En el plan de estudios de 2001 existen dos asignaturas troncales pertenecientes al Área ISA: Análisis Dinámico de Sistemas (2º curso, 3T+1.5P) y Sistemas Automáticos (4º curso, 3T+3P), no existiendo asignaturas obligatorias.

De acuerdo con la estructura y asignación de créditos impuesta por el plan de estudios, parece lógico dividir a grandes rasgos la docencia troncal de ISA enfocándola hacia el *análisis* de sistemas para la troncal de 2º y hacia los métodos de *síntesis* y *diseño* de sistemas de control para la troncal de 4º.

Esta división, sin embargo, no debe ser rigurosa sino que debe tener algunos puntos en común, aunque los enfoques sean diferentes, por varias razones:

Contenidos troncales

Desglose entre las asignaturas de 2º y 4º

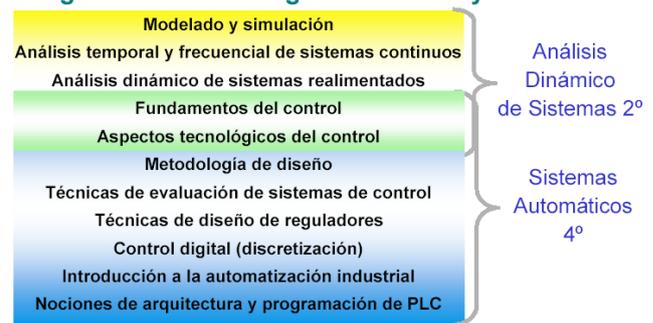


Figura 2: Desglose de las asignaturas troncales propuesto para el Plan de Estudios de 2001.

- En primer lugar, el alumno debe percibir una sensación de *unidad* y *continuidad*, esto es, no debe percibir ambas asignaturas –entre las que median casi dos años– como bloques separados e inconexos.
- En segundo lugar, los sistemas realimentados constituyen el elemento esencial de la Ingeniería de Sistemas y Automática y pueden ser estudiados desde los puntos de vista de *análisis* y de *síntesis*.
- Finalmente, algunos conceptos, como la noción de realimentación y los márgenes de ganancia y fase, son utilizados en asignaturas de Electrónica que se imparten con anterioridad a la troncal de 4º.

Por estas razones, se propone el siguiente desglose:

Análisis Dinámico de Sistemas (2º) Esta asignatura se dedica al estudio de los sistemas desde el punto de vista del *análisis*: modelado y simulación de sistemas, análisis temporal, análisis frecuencial, concepto de realimentación, introducción al análisis dinámico y en régimen permanente de sistemas realimentados, incluyendo también el estudio de la estabilidad mediante técnicas frecuenciales como el criterio de Nyquist y, finalmente, aspectos tecnológicos relacionados con la adquisición de datos.

Sistemas Automáticos (4º) Esta asignatura se dedica a la *síntesis* y diseño de los sistemas automáticos de control: metodología de diseño, fundamentos del control, técnicas de diseño de reguladores (lugar de las raíces, compensación en frecuencia, etc.), introducción al control digital, aspectos tecnológicos del control así como una introducción a la automatización industrial y los autómatas programables.

Análisis Dinámico de Sistemas (2º)

Sistemas Automáticos (4º)

	Teo.	Lab.	Sim.		Teo.	Lab.	Sim.
BT I. Modelado y Simulación de Sistemas				BT I. El Problema del Control			
T1 Concepto de Sistema	1h			T1 Sistemas Automáticos	2h		
T2 Representación Externa	3h			T2 Metodología de diseño de sistemas de control	1h		
T3 Representación Interna	2h			T3 Realimentación	3h		
T4 Sistemas Físicos	2h			T4 Sensibilidad	3h		PC1 3h
T5 Introducción a la Simulación	→PC1		PC1 2h	BT II. Diseño de Reguladores			
T6 Análisis Modular	→PC2		PC2 2h	T5 Análisis en régimen permanente	1h	L1 2h	
BT II. Análisis Temporal de Sistemas				T6 Diseño mediante el lugar de las raíces I	2h	L2 2h	
T7 Introducción al Análisis Temporal	1h			T7 Diseño mediante el lugar de las raíces II	2h	L3 2h	PC2 2h
T8 Señales de prueba	1h			T8 Diseño en el dominio de la frecuencia	2h		PC3 2h
T9 Sistemas de primer orden	1h			T9 Arquitecturas de control	2h		PC4 2h
T10 Sistemas de segundo orden	2h			T10 Técnicas empíricas: método Ziegler-Nichols	→PC5		PC5 2h
T11 Sistemas de orden superior	2h	L1 2h		T11 Introducción al control digital	2h		PC6 2h
BT III. Análisis Frecuencial de Sistemas				BT III. Aspectos Tecnológicos del Control			
T12 Contenido en frecuencia de una señal	1h			T12 Sensores	2h		
T13 Respuesta en frecuencia de un sistema	2h			T13 Actuadores	2h		PC7 2h
T14 Representaciones en frecuencia	2h	L2 2h		T14 Implementación del control digital	2h		PC8 3h
T15 Relación tiempo-frecuencia	2h		PC3 2h	BT IV. Automatización Industrial			
BT IV. Análisis Dinámico de Sistemas Realimentados				T15 Control distribuido	2h	L4 2h	
T16 Concepto de Realimentación	2h			T16 El autómata programable	2h	L5 2h	
T17 Análisis de la estabilidad	2h			T17 Lenguajes de programación de autómatas	→L5,L6	L6 2h	
T18 Análisis en régimen permanente	1h			Total:	30h	12h	18h
T19 Análisis dinámico	→PC4		PC4 2h			
BT V. Adquisición de Datos							
T20 Sensores	2h	L3 1h					
T21 Convertidores A/D	1h						
T22 Muestreo y Aliasing	→PC5		PC5 2h				
Total:	30h	5h	10h				

Figura 3: Programas de las asignaturas troncales de ISA en el Plan de Estudios de 2001 en la EPSIG de la Universidad de Oviedo.

Referencias

- [1] Panos Antsaklis, Tamer Basar, Ray DeCarlos, Harris McClamroch, Mark Spong, and Stephen Yurkovich. Report on the NSF/CSS Workshop on New Directions in Control Engineering Education. *IEEE Control Systems*, oct 1999.
- [2] Karl J. Aström. *Control System Design. Lecture notes for ME 155A*. Department of Mechanical and Environmental Engineering. University of California Santa Barbara., 2003.
- [3] R.C. Dorf and R.H. Bishop. *Modern Control Systems*. Prentice-Hall, 9 edition, 2001.
- [4] Gene F. Franklin, J. David Powell, and Abbas Emami-Naeini. *Feedback Control of Dynamic Systems (4ª Edición)*. Prentice Hall, 2002.
- [5] Graham C. Goodwin, Stefan F. Graebe, and Mario E. Salgado. *Control System Design*. Prentice Hall, 2001.
- [6] Richard M. Murray, Karl J. Aström, Stephen P. Boyd, Roger W. Brockett, and Gunter Stein. Future directions in control in an information-rich world. *IEEE Control Systems Magazine*, 23(2):20–33, April 2003.
- [7] Gunter Stein. Respect the unstable. *IEEE Control Systems Magazine*, 23(4):12–25, August 2003.