

## FICHA TÉCNICA DE LA ASIGNATURA

<b>Datos de la asignatura</b>	
Nombre	<b>Ampliación de Control</b>
Código	<b>DEA-IND-321</b>
Titulación	<b>Grado en Ingeniería Electromecánica</b>
Curso	<b>3º</b>
Cuatrimestre	<b>2º</b>
Créditos ECTS	<b>7,5 ECTS</b>
Carácter	<b>Obligatoria de especialidad</b>
Departamento	<b>Electrónica, Automática y Comunicaciones</b>
Área	<b>Sistemas de Control y Electrónica de Potencia</b>
Universidad	<b>Universidad Pontificia Comillas</b>
Horario	
Profesores	<b>Juan Luis Zamora Macho</b>
Descriptor	

<b>Datos del profesorado</b>	
<b>Profesor</b>	
Nombre	<b>Juan Luis Zamora Macho</b>
Departamento	<b>Electrónica, Automática y Comunicaciones</b>
Área	
Despacho	<b>D-212</b>
e-mail	<b>zamora@comillas.edu</b>
Horario de Tutorías	
<b>Profesores de laboratorio</b>	
Nombre	<b>Alberto Abanades Sánchez</b>
Nombre	<b>Antonio González Elías</b>

## DATOS ESPECÍFICOS DE LA ASIGNATURA

### Contextualización de la asignatura

#### Aportación al perfil profesional de la titulación

En el perfil profesional del graduado en Ingeniería Electromecánica, esta asignatura pretende introducir al alumno en la implantación digital de controles PID y el diseño de controles digitales por realimentación del estado y mediante síntesis de polinomios. El empleo cada vez más extendido de microprocesadores y otros dispositivos de cálculo en el entorno industrial motiva la formación del alumno en el análisis y diseño de sistemas de control en tiempo discreto.

Al finalizar el curso, los alumnos deberán dominar el concepto de señal y sistema en tiempo discreto y el uso de la transformada Z para obtener la función de transferencia en tiempo discreto. Además deberán conocer las relaciones existentes con las técnicas de modelado de sistemas en tiempo continuo.

En esta asignatura también se revisan las técnicas de modelado y análisis de sistemas dinámicos, tanto lineales como no lineales, mediante la representación de estado, y la linealización de sistemas no lineales alrededor de un punto de operación. En los ejemplos presentados se hace especial énfasis en su aplicación práctica para que el alumno tome conciencia de la importancia del modelado matemático en todos los ámbitos de la ingeniería industrial.

Otro objetivo del curso es que el alumno conozca el efecto de seleccionar períodos de muestreo pequeños, medianos o grandes y los métodos de discretización disponibles para convertir un control PID en un algoritmo programable en un microprocesador. Finalmente, el alumno deberá estar capacitado para diseñar controles en tiempo discreto mediante realimentación del estado, incluyendo acción integral en la referencia y observador de estado, y las técnicas de control digital basadas en síntesis de polinomios.

Debido a que esta asignatura tiene un carácter mixto teórico-experimental, se añaden a los conceptos teóricos los de carácter práctico mediante la resolución de problemas y la realización de trabajos en el laboratorio en los que se consolidarán los fundamentos teóricos estudiados. Además, se profundizará en el uso de herramientas informáticas (Matlab y Simulink) que facilitan el proceso de modelado, análisis y diseño de cualquier sistema de control en tiempo discreto.

#### Prerrequisitos

Principios del control por realimentación. Sistemas en tiempo continuo: transformada de Laplace, función de transferencia, polos y ceros, diagramas de bloques. Principales propiedades y especificaciones de un sistema de control: estabilidad, amortiguamiento, precisión y rapidez. Relaciones entre la respuesta temporal y la respuesta en frecuencia. Diseño de reguladores PID por respuesta en frecuencia. MATLAB y Simulink.

## Competencias - Objetivos

### Competencias Genéricas del título-curso

CG2.	Capacidad para la dirección de las actividades objeto de los proyectos de ingeniería descritos en la competencia CG1.
CG3.	Conocimiento en materias básicas y tecnológicas, que les capacite para el aprendizaje de nuevos métodos y teorías, y les dote de versatilidad para adaptarse a nuevas situaciones.
CG4.	Capacidad de resolver problemas con iniciativa, toma de decisiones, creatividad, razonamiento crítico y de comunicar y transmitir conocimientos, habilidades y destrezas en el campo de la Ingeniería Industrial.
CG5.	Conocimientos para la realización de mediciones, cálculos, valoraciones, tasaciones, peritaciones, estudios, informes, planes de labores y otros trabajos análogos.
CG10.	Capacidad de trabajar en un entorno multilingüe y multidisciplinar.

### Competencias específicas / Refuerzo rama industrial

CEN8.	Conocimientos de regulación automática y técnicas de control y su aplicación a la automatización industrial.
CEN11.	Capacidad para diseñar sistemas de control y automatización industrial.

### Resultados de Aprendizaje<sup>1</sup>

<b>Entender el efecto de la implantación digital en las prestaciones de un sistema de control.</b>
RA1. Conoce los elementos que intervienen en la implantación de un control digital y comprende la función que desempeña cada uno de ellos.
RA2. Es capaz de valorar la influencia de un período de muestro concreto en la respuesta del sistema de control.
RA3. Sabe compensar el efecto del muestreo en la fase de diseño de un control implantado en tiempo discreto.
<b>Saber trabajar con señales y sistemas en tiempo discreto para implantar digitalmente un sistema de control y analizar su respuesta.</b>
RA4. Entiende el efecto de muestrear una señal continua y el problema del aliasing.
RA5. Sabe calcular la transformada Z de una señal en tiempo discreto y conoce sus propiedades fundamentales.

<sup>1</sup> Los resultados de aprendizaje son indicadores de las competencias que nos permiten evaluar el grado de dominio que poseen los alumnos. Las competencias suelen ser más generales y abstractas. Los R.A. son indicadores observables de la competencia

- RA6. Conoce las relaciones entre una ecuación en diferencias y su función de transferencia en tiempo discreto.
- RA7. Sabe calcular e interpretar los polos, los ceros, las ganancias estática y alternada y la respuesta en frecuencia de una función de transferencia en tiempo discreto.
- RA8. Conoce la condición de estabilidad de un sistema en tiempo discreto y sabe transformar dinámicas entre tiempo continuo y tiempo discreto.
- RA9. Es capaz de construir un diagrama de bloques en tiempo discreto y calcular a partir de él la función de transferencia equivalente dada una entrada y una salida.
- RA10. Conoce los métodos de discretización fundamentales para la planta y el control y sabe aplicarlos en sistemas en tiempo discreto y mixtos.

**Conocer y saber aplicar a sistemas físicos las técnicas de modelado basadas en espacio de estado.**

- RA11. Sabe obtener una representación de estado de cualquier sistema lineal: circuitos eléctricos o electrónicos, sistemas mecánicos de traslación y rotación, sistemas térmicos, etc.
- RA12. Sabe obtener una representación de estado de un sistema no lineal, calcular cualquier punto de operación y linealizar el modelo alrededor del punto de operación.
- RA13. Sabe relacionar la función de transferencia y la representación de estado de un sistema lineal e invariante en el tiempo (LTI).
- RA14. Es capaz de obtener los polos de un sistema LTI y la respuesta libre y forzada a partir de su representación de estado.

**Saber analizar y diseñar un sistema de control en tiempo discreto por realimentación del estado.**

- RA15. Sabe obtener la representación de estado en tiempo discreto de la planta para diseñar un control por realimentación de estado a partir de ella.
- RA16. Es capaz de diseñar un control por realimentación de estado basado en la asignación de polos en lazo cerrado, incluyendo acción integral para seguimiento de referencia constante en régimen permanente.
- RA17. Sabe cómo diseñar un observador de estado, tanto de orden completo como de orden reducido, para evitar la medida de las variables de estado.

**Conocer y saber aplicar otras técnicas de control digital por síntesis de polinomios.**

- RA18. Sabe cómo diseñar e implantar un control digital *dead beat*.
- RA19. Sabe cómo diseñar e implantar un control digital de dos grados de libertad.

**Saber utilizar Matlab y Simulink para modelar, simular, analizar y diseñar cualquier sistema de control en tiempo continuo y discreto.**

- RA20. Sabe cómo construir el diagrama de bloques de cualquier sistema en Simulink, tanto en tiempo continuo como en tiempo discreto y mixtos, y simular su respuesta ante cualquier entrada.
- RA21. Sabe emplear la Toolbox de Control de Matlab para analizar las características fundamentales de cualquier sistema de control, tanto en tiempo continuo como en tiempo discreto.

RA22. Sabe usar Matlab y su Toolbox de Control para diseñar cualquier sistema de control: PID, realimentación de estado o controladores digitales *dead beat* o de dos grados de libertad.

## BLOQUES TEMÁTICOS Y CONTENIDOS

### Contenidos – Bloques Temáticos

#### BLOQUE 1: Implantación digital de controles PID

En este primer bloque temático se presentan los conceptos fundamentales de los sistemas en tiempo discreto y se aborda la implantación digital de controles PID.

##### Tema 1: INTRODUCCIÓN AL CONTROL EN TIEMPO DISCRETO

**1.1** Estructura de un sistema de control en tiempo discreto. Muestreo, retención del mando y algoritmo del control.

**1.2** Control en tiempo discreto vs. control en tiempo continuo: ventajas e inconvenientes.

##### Tema 2: SEÑALES Y SISTEMAS EN TIEMPO DISCRETO

**2.1** Señal en tiempo discreto.

**2.2** Transformada Z: definición, propiedades, tabla de transformadas.

**2.3** Antitransformada Z.

**2.4** Sistema en tiempo discreto: ecuación en diferencias y función de transferencia.

**2.5** Cálculo de la respuesta temporal: influencia de polos y ceros.

**2.6** Estabilidad.

**2.7** Régimen permanente de sistemas estables: ganancia estática y respuesta en frecuencia.

##### Tema 3: SISTEMAS REALIMENTADOS DE CONTROL EN TIEMPO DISCRETO

**3.1** Muestreo de la medida y retención del mando.

**3.2** Aproximación del muestreo y la retención: modelo analógico modificado.

**3.3** Control P e influencia del período de muestreo.

**3.4** Discretización exacta de la planta mediante retenedor de orden 0.

**3.5** Simulación y análisis de sistemas mixtos.

##### Tema 4: DISEÑO E IMPLANTACIÓN DE CONTROLES PID EN TIEMPO DISCRETO

**4.1** Revisión del diseño de controles PID en tiempo continuo por respuesta en frecuencia.

**4.2** Métodos de discretización del sistema de control: aproximación de la derivada y de la integral en diferencias finitas.

**4.3** Esquemas de implantación especiales: antiwindup, acción diferencial aplicada a la salida y ponderación de la referencia.

#### BLOQUE 2: Modelado en espacio de estado y diseño de controles mediante realimentación de estado y síntesis de polinomios

En este segundo bloque temático se presenta el modelado de sistemas dinámicos mediante representación de estado y se introducen técnicas de control en tiempo discreto alternativas al PID: control por realimentación de estado y control por síntesis de polinomios.

##### Tema 5: MODELADO EN ESPACIO DE ESTADO

**5.1** Modelado en espacio de estado de sistemas lineales y no lineales: representación de estado.

**5.2** Modelado en espacio de estado de sistemas físicos: circuitos eléctricos, sistemas mecánicos y sistemas térmicos.

**5.3** Modelado no lineal: concepto de punto de equilibrio y modelo linealizado.

**5.4** Relación entre representación de estado y función de transferencia.

##### Tema 6: CONTROL POR REALIMENTACIÓN DEL ESTADO.

**6.1** Discretización exacta del modelo en espacio de estado.

**6.2** Diseño de un regulador por realimentación del estado mediante asignación de polos.

**6.3** Seguimiento de referencia mediante control integral.

<b>6.4</b> Estimación del estado: observadores de orden completo y orden reducido
<b>Tema 7: DISEÑO DE CONTROLES POR SÍNTESIS DE POLINOMIOS</b>
<b>7.1</b> Fundamento teórico del diseño de controles por síntesis de polinomios.
<b>7.2</b> Diseño de controles de un grado de libertad: controles dead beat.
<b>7.3</b> Diseño de controles de dos grados de libertad.

## METODOLOGÍA DOCENTE

### Aspectos metodológicos generales de la asignatura

Con el fin de conseguir el desarrollo de competencias propuesto, la materia se desarrollará teniendo en cuenta la actividad del alumno como factor prioritario. Ello implicará que tanto las sesiones presenciales como las no presenciales promoverán la implicación activa de los alumnos en las actividades de aprendizaje.

### Metodología Presencial: Actividades

- 1. Clase magistral y presentaciones generales:** Exposición de los principales conceptos y procedimientos mediante la explicación por parte del profesor. Incluirá presentaciones dinámicas, pequeños ejemplos prácticos y la participación reglada o espontánea de los estudiantes.
- 2. Resolución en clase de problemas prácticos:** Resolución de unos primeros problemas para situar al alumno en contexto. La resolución correrá a cargo del profesor y los alumnos de forma cooperativa.
- 3. Prácticas de laboratorio:** Se formarán grupos de trabajo que tendrán que realizar prácticas de laboratorio regladas o diseños de laboratorio. Las prácticas de laboratorio podrán requerir la realización de un trabajo previo de preparación y finalizar con la redacción de un informe de laboratorio o la inclusión de las distintas experiencias en un cuaderno de laboratorio.

### Metodología No presencial: Actividades

- 1. Estudio individual del material a discutir en clases posteriores:** Actividad realizada individualmente por el estudiante cuando analiza, busca e interioriza la información que aporta la materia y que será discutida con sus compañeros y el profesor en clases posteriores.
- 2. Resolución de problemas prácticos a resolver fuera del horario de clase por parte del alumno:** El alumno debe utilizar e interiorizar los conocimientos aportados en la materia. La corrección con toda la clase se realizará por parte de alguno de los alumnos o el profesor según los casos. La corrección individualizada de cada ejercicio la realizará el propio alumno u otro compañero según los casos (método de intercambio).
- 3. Trabajos de carácter práctico individual:** Actividades de aprendizaje que se realizarán de forma individual fuera del horario lectivo, que requerirán algún tipo de investigación o la lectura de distintos textos.
- 4. Resolución grupal de problemas:** El profesor planteará pequeños problemas que los alumnos resolverán en pequeños grupos en clase y cuya solución discutirán con el resto de grupos.
- 5. Trabajo en grupo:** Se formarán grupos de trabajo que tendrán que realizar una tarea fuera del horario lectivo que requerirá compartir la información y los recursos entre los miembros con vistas a alcanzar un objetivo común.

El objetivo principal del trabajo no presencial es llegar a entender y comprender los conceptos teóricos de la asignatura, así como ser capaz de poner en práctica estos conocimientos para resolver los diferentes tipos de problemas.

<b>RESUMEN HORAS DE TRABAJO DEL ALUMNO</b>			
<b>HORAS PRESENCIALES</b>			
Lección magistral	Resolución de problemas	Prácticas laboratorio	Evaluación
25	14	30	6
<b>HORAS NO PRESENCIALES</b>			
Trabajo autónomo sobre contenidos teóricos	Trabajo autónomo sobre contenidos prácticos	Realización de trabajos colaborativos	Estudio
35	40	35	40
<b>CRÉDITOS ECTS:</b>			<b>7,5 (225 horas)</b>

### **EVALUACIÓN Y CRITERIOS DE CALIFICACIÓN**

<b>Actividades de evaluación</b>	<b>Criterios de evaluación</b>	<b>PESO</b>
Examen Final	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Comprensión de conceptos.</li> <li>- Aplicación de conceptos a la resolución de problemas prácticos.</li> <li>- Análisis e interpretación de los resultados obtenidos en la resolución de problemas.</li> <li>- Presentación y comunicación escrita.</li> </ul>	45%
Realización de pruebas de seguimiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Comprensión de conceptos.</li> <li>- Aplicación de conceptos a la resolución de problemas prácticos.</li> <li>- Análisis e interpretación de los resultados obtenidos en la resolución de problemas.</li> </ul>	15%
Laboratorio	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Comprensión de conceptos.</li> <li>- Aplicación de conceptos a la resolución de problemas prácticos y a la realización de prácticas en el laboratorio.</li> <li>- Análisis e interpretación de los resultados obtenidos en las prácticas de laboratorio.</li> <li>- Capacidad de trabajo en grupo.</li> <li>- Presentación y comunicación escrita.</li> </ul>	40%

## Calificaciones.

### Calificaciones

#### Convocatoria ordinaria:

- La nota del examen de la convocatoria ordinaria, con un mínimo de 5, un 45%.
- La media ponderada de las pruebas de seguimiento realizadas a lo largo del curso un 15%.
- La nota de laboratorio, con un mínimo de 5, un 40%.

#### Convocatoria extraordinaria:

- La nota del examen de la convocatoria extraordinaria, con un mínimo de 5, un 45%.
- La media ponderada de las pruebas de seguimiento realizadas a lo largo del curso un 15%.
- La nota de laboratorio, con un mínimo de 5, un 40%.

La asistencia a clase es obligatoria, según el artículo 93 de las Normas Académicas de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI). Los requisitos de asistencia se aplicarán de forma independiente para las sesiones de teoría y de laboratorio:

- En el caso de las sesiones de teoría, el incumplimiento de esta norma podrá impedir presentarse a examen en la convocatoria ordinaria.
- En el caso de las sesiones de laboratorio, el incumplimiento de esta norma podrá impedir presentarse a examen en la convocatoria ordinaria y en la extraordinaria. En cualquier caso las faltas no justificadas a sesiones de laboratorio serán penalizadas en la evaluación.

## PLAN DE TRABAJO Y CRONOGRAMA<sup>2</sup>

Actividades No presenciales	Fecha de realización	Fecha de entrega
<ul style="list-style-type: none"><li>Lectura y estudio de los contenidos teóricos en el material disponible en la página web de la asignatura</li></ul>	Después de cada clase	
<ul style="list-style-type: none"><li>Resolución de los problemas propuestos</li></ul>	Semanalmente	
<ul style="list-style-type: none"><li>Preparación de las pruebas que se realizarán durante las horas de clase</li></ul>		Semanas 2, 5, 7, 9 y 11
<ul style="list-style-type: none"><li>Preparación del examen final</li></ul>	Mayo	
<ul style="list-style-type: none"><li>Preparación de las pruebas de evaluación al final de cada proyecto del laboratorio</li></ul>		Semanas 4 y 13

## BIBLIOGRAFÍA Y RECURSOS

### Bibliografía Básica

- F. Luis Pagola. Control Digital. Universidad Pontificia Comillas, 2012
- N. S. Nise. Control Systems Engineering, 6th Edition. John Wiley and Sons. 2011.

### Bibliografía Complementaria

- Franklin, Powell, Workman. Digital Control of Dynamic Systems. 3rd ed. Addison-Wesley, 1998.
- Phillips, Nagle. Digital Control System Analysis and Design. 3rd ed. Prentice Hall, 1995
- Åström, Wittenmark. Computer Controlled Systems. 3rd ed. Prentice Hall, 1997
- Dutton, Thompson, Barraclough. The Art of Control Engineering. Addison-Wesley, 1997
- Bolzern, Scattolini, Schiavoni. Fundamentos de Control Automático. 3ª ed. Mc Graw Hill, 2008.

## FICHA RESUMEN

Ver páginas siguientes.

---

<sup>2</sup> En la ficha resumen se encuentra una planificación detallada de la asignatura. Esta planificación tiene un carácter orientativo y las fechas podrán irse adaptando de forma dinámica a medida que avance el curso.



7	31	Cálculo de la respuesta temporal en espacio de estado. Relación entre representación de estado y función de transferencia.	4	CG3,4,5,10 - CCR16 - CE3,6	Lección expositiva, resolución en clase de problemas, tutorías	Estudio Individual, resolución de problemas, profundización de temas.	1	2
	32	Resolución de problemas del tema 4.	4				1	2
	33	<b>Prueba 3. Con calculadora y ordenador</b>			<b>Prueba individual tipo resolución de problemas con calculadora + ordenador</b>	<b>Preparación de la prueba</b>	<b>1</b>	<b>5</b>
	34	Laboratorio. Segway: Control PID.			Práctica de laboratorio	Preparación de las prácticas, trabajo previo, análisis de los resultados, preparación de informes y presentaciones.	2	4
	35							
8	36	Discretización exacta del modelo en espacio de estado.	5	CG3,4,5,10 - CCR16 - CE4,6	Lección expositiva, resolución en clase de problemas, tutorías	Estudio Individual, resolución de problemas, profundización de temas.	1	2
	37	Diseño de un regulador por realimentación del estado mediante asignación de polos.	5				1	2
	38	Diseño de un regulador por realimentación del estado mediante asignación de polos.	5	1	2			
	39	Laboratorio. Segway: Control por realimentación de estado.			Práctica de laboratorio	Preparación de las prácticas, trabajo previo, análisis de los resultados, preparación de informes y presentaciones.	2	4
	40							
9	41	Seguimiento de referencia mediante control integral.	5	CG3,4,5,10 - CCR16 - CE4,6	Lección expositiva, resolución en clase de problemas, tutorías	Estudio Individual, resolución de problemas, profundización de temas.	1	2
	42	Seguimiento de referencia mediante control integral.	5				1	2
	43	Resolución de problemas del tema 5.	5	1	2			
	44	Laboratorio. Segway: Regulador por realimentación de estado.			Práctica de laboratorio	Preparación de las prácticas, trabajo previo, análisis de los resultados, preparación de informes y presentaciones.	2	4
	45							
10	46	<b>Prueba 4. Con calculadora y ordenador</b>			<b>Prueba individual tipo resolución de problemas con calculadora + ordenador</b>	<b>Preparación de la prueba</b>	<b>1</b>	<b>5</b>
	47	Estimación del estado: observadores de orden completo.	6	CG3,4,5,10 - CCR16 - CE4,6	Lección expositiva, resolución en clase de problemas, tutorías	Estudio Individual, resolución de problemas, profundización de temas.	1	2
	48	Estimación del estado: observadores de orden completo.	6				1	2
	49	Laboratorio. Segway: Control integral por realimentación de estado.			Práctica de laboratorio	Preparación de las prácticas, trabajo previo, análisis de los resultados, preparación de informes y presentaciones.	2	4
	50							
11	51	Estimación del estado: observadores de orden reducido.	6	CG3,4,5,10 - CCR16 - CE4,6	Lección expositiva, resolución en clase de problemas, tutorías	Estudio Individual, resolución de problemas, profundización de temas.	1	2
	52	Estimación del estado: observadores de orden reducido.	6				1	2
	53	Resolución de problemas del tema 5.	6	1	2			
	54	Laboratorio. Segway: Seguimiento de pare.			Práctica de laboratorio	Preparación de las prácticas, trabajo previo, análisis de los resultados, preparación de informes y presentaciones.	2	4
	55							
12	56	<b>Prueba 5. Con calculadora y ordenador</b>			<b>Prueba individual tipo resolución de problemas con calculadora + ordenador</b>	<b>Preparación de la prueba</b>	<b>1</b>	<b>5</b>
	57	Diseño de controles por síntesis de polinomios.	7	CG3,4,5,10 - CCR16 - CE5,6	Lección expositiva, resolución en clase de problemas, tutorías	Estudio Individual, resolución de problemas, profundización de temas.	1	2
	58	Diseño de controles por síntesis de polinomios.	7				1	2
	59	Laboratorio. Segway: Coordinación y optimización de controles.			Práctica de laboratorio	Preparación de las prácticas, trabajo previo, análisis de los resultados, preparación de informes y presentaciones.	2	4
	60							
13	61	Resolución de problemas del tema 5.	7	CG3,4,5,10 - CCR16 - CE5-6	Lección expositiva, resolución en clase de problemas, tutorías	Estudio Individual, resolución de problemas, profundización de temas.	1	2
	62	Repaso: resolución de problemas de todos los temas.	1 a 7	CG3,4,5,10 - CCR16 - CE1-6			1	2
	63	Repaso: resolución de problemas de todos los temas.	1 a 7		1	2		
	64	Laboratorio. Segway: Evaluación y concurso.			Práctica de laboratorio	Preparación de las prácticas, trabajo previo, análisis de los resultados, preparación de informes y presentaciones.	2	4
	65							
		<b>Examen final</b>				<b>Preparación del Examen Final.</b>	<b>3</b>	<b>12</b>
						<b>Total</b>	<b>68</b>	<b>157</b>
						<b>Horas</b>	<b>225</b>	
						<b>ECTS</b>	<b>7,50</b>	