

## FICHA TÉCNICA DE LA ASIGNATURA

Datos de la asignatura	
Nombre	Máquinas y Accionamientos Eléctricos
Código	AES06
Titulación	Grado en Ingeniería Electromecánica
Curso	3º
Cuatrimestre	2º
Créditos ECTS	9 ECTS
Carácter	Optativa
Departamento	Departamento de Ingeniería Eléctrica
Área	Máquinas Eléctricas
Universidad	Comillas
Horario	
Profesores	Fidel Fernández, Ignacio Egido, Lukas Sigrist, Carlos Domingo
Descriptor	Máquinas eléctricas, Accionamientos Eléctricos

Datos del profesorado	
Coordinador de la teoría, laboratorio y profesor	
Nombre	Fidel Fernández
Departamento	Departamento de Ingeniería Eléctrica
Despacho	D – 307
e-mail	fidelf@upcomillas.es
Teléfono	
Tutorías	De lunes a viernes

Datos del profesorado	
Profesor de teoría y laboratorio	
Nombre	Lukas Sigrist
Departamento	IIT
Despacho	Despacho en el IIT, Francisco de Ricci, nº 3
e-mail	Lukas.Sigrist@iit.upcomillas.es
Teléfono	
Tutorías	De lunes a viernes

<b>Datos del profesorado</b>	
<b>Profesor de laboratorio</b>	
Nombre	Carlos Domingo
Departamento	Departamento de Ingeniería Eléctrica
Despacho	D-301 (despacho general del departamento)
e-mail	carlos.domingo@enel.com
Teléfono	
Tutorías	Consultar con el profesor

<b>Datos del profesorado</b>	
<b>Profesor de laboratorio</b>	
Nombre	Luis Diez
Departamento	Departamento de Ingeniería Eléctrica
Despacho	Despacho en el IIT, Francisco de Ricci, nº 3
e-mail	luis.diez@iit.comillas.edu
Teléfono	
Tutorías	Consultar con el profesor

<b>Datos del profesorado</b>	
<b>Profesor de laboratorio</b>	
Nombre	Javier Herrero
Departamento	Departamento de Ingeniería Eléctrica
Despacho	D – 301
e-mail	j.herrero@comillas.edu
Teléfono	
Tutorías	Consultar con el profesor

## **DATOS ESPECÍFICOS DE LA ASIGNATURA**

<b>Contextualización de la asignatura</b>
<b>Aportación al perfil profesional de la titulación</b>
<p>El control de velocidad y par para la optimización de bombas, trenes, vehículos eléctricos, generadores eólicos y un largo etcétera de aplicaciones, requiere de conocimientos multidisciplinares, y en especial de máquinas eléctricas y técnicas de control.</p> <p>En esta asignatura se intenta dotar al alumno de esos extensos conocimientos a partir de los ya adquiridos en las asignaturas anteriores de máquinas eléctricas y control.</p> <p>La asignatura tiene un claro carácter experimental por lo que los alumnos también serán capaces de realizar simulaciones detalladas con el ordenador y de programar y manejar variadores de velocidad comerciales.</p>
<b>Prerrequisitos</b>
<p>Asignaturas relacionadas: Máquinas Eléctricas de 3º curso, primer semestre. Regulación automática de 3º curso, primer semestre.</p> <p>En el laboratorio de la asignatura se precisan conocimientos básicos de seguridad eléctrica, manejo de equipos de medida, montaje de esquemas eléctricos y la elaboración de informes de ensayos. Finalmente, se requiere el manejo adecuado de aplicaciones informáticas en la ingeniería como el Matlab/Simulink.</p>

<b>Competencias - Objetivos</b>	
<b>Competencias Genéricas del título-curso</b>	
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.
CG6.	Capacidad para el manejo de especificaciones, reglamentos y normas de obligado cumplimiento.
CG10.	Capacidad de trabajar en un entorno multilingüe y multidisciplinar.

<b>Competencias Comunes/Específicas</b>	
CEE1.	Capacidad para el cálculo y diseño de máquinas eléctricas.
CEE2.	Conocimientos sobre control de máquinas y accionamientos eléctricos y sus aplicaciones.
CEE7.	Conocimiento aplicado de electrónica de potencia.

<b>Resultados de Aprendizaje</b>	
<b>Capacidad para el cálculo y diseño de máquinas eléctricas.</b>	
RA1.	Comprender y elegir el modelo adecuado de máquina eléctrica para el problema concreto que se pretende resolver.
RA2.	Conocer los modelos dinámicos de las máquinas eléctricas rotativas. Saber cuándo son aconsejables los modelos de régimen estacionario y cuándo los modelos dinámicos.
<b>Conocimientos sobre control de máquinas y accionamientos eléctricos y sus aplicaciones.</b>	
RA3.	Comprender en detalle el control escalar de la máquina de inducción. Elegir el esquema de control más adecuado dependiendo de la aplicación. Programar los equipos correspondientes.
RA4.	Diseñar esquemas de control vectorial para las distintas máquinas estudiadas: inducción, síncrona, etc. Evaluar sus ventajas e inconvenientes y sus diversas aplicaciones. Elegir el esquema de control más adecuado dependiendo de la aplicación
RA5.	Manejar herramientas de simulación de los esquemas de control estudiados siempre bajo la supervisión del sentido común y la correcta comprensión de los fenómenos.
RA6.	Capacidad para programar y manejar variadores de velocidad comerciales.

**Conocimiento aplicado de electrónica de potencia.**

- RA7. Conocer el esquema de un inversor trifásico con chopper de frenado y su funcionamiento PWM en su aplicación, tanto para los accionamientos eléctricos como para su uso en FACTS en sistemas eléctricos.
- RA8. Conocer las características básicas de un DSP y su integración en el control de la electrónica de potencia.

## BLOQUES TEMÁTICOS Y CONTENIDOS

### Contenidos – Bloques Temáticos

#### Teoría

#### Tema 1: Introducción a los accionamientos eléctricos

- 1.1 Qué son.
- 1.2 Para qué sirven.
- 1.3 Ejemplos de la industria.

#### Tema 2: Modelado de los sistemas mecánicos rotativos dinámicos

- 2.1 Introducción
- 2.2 Ecuación dinámica de sistemas rodantes.
- 2.3 Esquema general de análisis con máquinas eléctricas rotativas.
- 2.4 Engranajes y poleas.
- 2.5 Resonancia torsional y analogía eléctrica.
- 2.6 Unitarias en los sistemas mecánicos.

#### Tema 3: Control de velocidad escalar del motor de inducción

- 3.1 Introducción
- 3.2 Repaso de los principios básicos de funcionamiento de la máquina de inducción:  
Esquema equivalente de régimen permanente, curvas par-s y cálculos básicos.  
Régimen permanente vs. régimen dinámico.
- 3.3 Principios del control de flujo constante.
- 3.4 Zonas de operación y limitaciones.
- 3.5 El control V/f y la compensación de caída de tensión.
- 3.6 Arranque suave.
- 3.7 Esquemas de control en lazo abierto y en lazo cerrado, compensación del deslizamiento.

#### Tema 4: Introducción a la electrónica de potencia y al PWM escalar

- 4.1 El diodo. El transistor en corte y saturación. El GTO. El Tiristor.
- 4.2 Conversión AC/DC: el Rectificador. Rectificador monofásico de media onda y doble onda. Valor medio y valor eficaz. Armónicos en tensión y en corriente. Rectificador trifásico en estrella y en puente. Valor medio y valor eficaz.
- 4.3 Conversión DC/DC: chopper reductor, elevador e inverso.
- 4.4 Conversión DC/AC: el inversor. Inversor trifásico. Funcionamiento como rectificador síncrono.
- 4.5 Principio de funcionamiento del PWM sinusoidal, PWM trifásico.
- 4.6 Efectos sobre el motor de inducción de armónicos y limitaciones.

#### Tema 5: Máquina síncrona de polos salientes. Ejes dq.

- 5.1 Circuito equivalente. Valores típicos. Ensayos.
- 5.2 Repaso: principios básicos, tipos, circuito equivalente, par y potencia, ángulo de carga.
- 5.3 Problemática de los polos salientes.
- 5.4 Esquema equivalente de régimen permanente en ejes dq.

#### Tema 6: Teoría de los vectores espaciales en sistemas trifásicos

- 6.1 Introducción.
- 6.2 Vectores espaciales en sistemas trifásicos: descripción matemática y gráfica.
- 6.3 Sistemas de referencia: transformada de Park.
- 6.4 Vector espacial flujo de entrehierro y tensión inducida.
- 6.5 PWM vectorial.
- 6.6 Descripción dinámica de sistemas R-L trifásicos.
- 6.7 Esquema dinámico general de máquinas trifásicas.
- 6.8 Ecuación general de producción de par.

<b>Tema 7: Modelo dinámico de la máquina síncrona</b>
<p>7.1 Modelo dinámico sin devanados amortiguadores: Motor síncrono de imanes permanentes, Motor síncrono de reluctancia.</p> <p>7.2 Modelo con devanados amortiguadores.</p> <p>7.3 Relación con el modelo de régimen permanente. Parámetros típicos.</p>
<b>Tema 8: Modelo dinámico del motor de inducción</b>
<p>8.1 Modelo de máquina doblemente alimentada.</p> <p>8.2 Rotor en cortocircuito.</p> <p>8.3 Relación con el régimen permanente.</p>
<b>Tema 9: Control vectorial</b>
<p>9.1 Estructura general de los esquemas de control.</p> <p>9.2 Principio del grado de libertad.</p> <p>9.3 Control vectorial del motor de inducción: control directo e indirecto.</p> <p>9.4 Control vectorial del motor síncrono de imanes permanentes.</p> <p>9.5 Control vectorial del motor síncrono de reluctancia.</p> <p>9.6 Uso del DSP para la implementación del control. Convertidores A/D. Entradas/salidas digitales. Interrupciones.</p> <p>9.7 El encoder como elemento de medida de la velocidad y la posición. Tipos. Esquemas. Funcionamiento.</p>
<b>Tema 10: Diseño de reguladores vectoriales</b>
<p>10.1 Modelos simplificados de las máquinas con control en corriente.</p> <p>10.2 Modelado del inversor.</p> <p>10.3 Esquemas PID en ejes dq.</p> <p>10.4 Diseño de reguladores de desacoplo i/v. Ejemplos de diseño.</p>
<b>Tema 11: Introducción al control de aerogeneradores y FACTS</b>
<p>11.1 Control de aerogeneradores: topologías y esquemas básicos.</p> <p>11.2 FACTS. El principio de control PQ vectorial. Topologías básicas. Esquema de control básico.</p>
<b>Tema 12: Control de la máquina de corriente continua y Brushless DC</b>
<p>12.1 Introducción.</p> <p>12.2 Principios básicos de la máquina DC.</p> <p>12.3 Modelo equivalente.</p> <p>12.4 Control de velocidad. Chopper básico.</p> <p>12.5 Motor Brushless DC: funcionamiento y control básicos.</p>
<b>Prácticas de Laboratorio</b>
<p><b>Práctica 1: Introducción al Simulink y a la simulación de máquinas eléctricas rotativas.</b></p> <p><b>Práctica 2: Modelos de régimen permanente vs. modelos de régimen dinámico</b></p> <p><b>Práctica 3: Control V/f del motor de inducción. Simulación característica estática.</b></p> <p><b>Práctica 4: Control V/f del motor de inducción. Variador comercial. Uso básico.</b></p> <p><b>Práctica 5: Control V/f del motor de inducción. Variador comercial. PWM y transitorios de arranque.</b></p> <p><b>Práctica 6: Control V/f del motor de inducción. Simulación rampa de arranque y frenado.</b></p> <p><b>Práctica 7: Control V/f del motor de inducción. Simulación PWM.</b></p> <p><b>Práctica 8: Transitorios en máquina síncrona. Ejes dq y cambio de sistemas de</b></p>

**referencia.**

**Práctica 9: Transitorios en máquina síncrona. Devanados amortiguadores.**

**Práctica 10: Control vectorial en máquina de inducción. Lazo de corriente.**

**Práctica 11: Control vectorial en máquina de inducción. Lazo de velocidad.**

## METODOLOGÍA DOCENTE

### Aspectos metodológicos generales de la asignatura

Con el fin de conseguir el desarrollo de competencias propuesto, las sesiones presenciales como las no presenciales promoverán la implicación activa de los alumnos en las actividades de aprendizaje.

### Metodología Presencial: Actividades

1. **Lección expositiva:** 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. Previa a las sesiones teóricas se podrán realizar pequeñas pruebas para evaluar el trabajo no presencial de los alumnos.
2. **Resolución en clase de problemas ejemplo:** Resolución de algún problema clave para situar al alumno en contexto. La resolución correrá a cargo del profesor y los alumnos de forma cooperativa.
3. **Resolución en clase de problemas propuestos:** Resolución de problemas que el alumno ha debido preparar previamente. La resolución correrá a cargo del profesor y los alumnos de forma cooperativa.
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. **Prácticas de laboratorio.** Se formarán grupos de trabajo que tendrán que realizar prácticas de laboratorio regladas. Las prácticas de laboratorio requerirán de la realización de un trabajo previo de preparación y finalizar con la redacción de un informe de laboratorio. Previamente a toda práctica de laboratorio se realizará una pequeña prueba para comprobar la preparación de la misma.
6. **Tutorías** se realizarán en grupo e individualmente para resolver las dudas que se les planteen a los alumnos después de haber trabajado los distintos temas. Y también para orientar al alumno en su proceso de aprendizaje.

### Metodología No presencial: Actividades

1. **Estudio del material presentado en clase.** Actividad realizada individualmente por el estudiante repasando y completando lo visto en clase.
2. **Estudio del material teórico no presentado en clase.** Algunos temas serán estudiados por el alumno sin presentación teórica en clase. Se mandarían problemas y actividades individuales y cooperativas que luego se discutirán en clase para asegurarse de la correcta comprensión por parte del alumno
3. **Resolución de problemas propuestos.** La resolución correrá a cargo del profesor y los alumnos de forma cooperativa.
4. **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.
5. **Preparación de las prácticas** de laboratorio y elaboración de los informes de laboratorio.

El objetivo principal del trabajo no presencial es entender y comprender los conceptos de la asignatura, que sólo pueden alcanzarse mediante el trabajo del alumno.



<b>RESUMEN HORAS DE TRABAJO DEL ALUMNO (aproximado)</b>			
<b>HORAS PRESENCIALES</b>			
Lección magistral	Resolución de problemas	Prácticas laboratorio	Evaluación
29	32	22	3
<b>HORAS NO PRESENCIALES</b>			
Estudio autónomo teoría (T)	Resolución de Problemas (P)	Prácticas laboratorio (L)	Repaso y profundización (R)
12	37	47	84
<b>CRÉDITOS ECTS:</b>			<b>9 (270 horas)</b>

## **EVALUACIÓN Y CRITERIOS DE CALIFICACIÓN**

<b>TEORÍA (65%/100)</b>		
<b>Actividades de evaluación</b>	<b>Criterios de evaluación</b>	<b>PESO</b>
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> <li>- Presentación y comunicación escrita.</li> </ul>	30%
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>	70%
<b>LABORATORIO (35%/100)</b>		
<b>Actividades de evaluación</b>	<b>Criterios de evaluación</b>	<b>PESO</b>
Cálculos previos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lectura previa de las guías de la práctica.</li> <li>- Análisis crítico de los resultados obtenidos.</li> </ul>	20%
Informe escrito de la práctica realizada	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Análisis crítico de los resultados obtenidos en las prácticas de laboratorio.</li> <li>- Presentación y comunicación escrita.</li> </ul>	20%
Trabajo presencial en grupo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Capacidad de trabajo en grupo.</li> <li>- Entusiasmo en la realización de la tarea.</li> </ul>	10%
Examen Final	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Capacidad para la creación de modelos de simulación dinámica</li> <li>- Ajuste correcto de los parámetros de simulación.</li> <li>- Análisis crítico de los resultados obtenidos</li> <li>- Presentación y comunicación escrita.</li> </ul>	50%
Para hacer media entre teoría y laboratorio hay que obtener, al menos, una puntuación de 5 sobre 10 en cada parte.		

## CALIFICACIONES

### Calificaciones

#### Convocatoria ordinaria

- **Nota Total:** 65% Teoría + 35% Laboratorio.
- **Teoría** (sobre 100%): 2x15% pruebas de seguimiento, 70% examen final. Las pruebas de seguimiento se realizarán en horas de clase.
- **Laboratorio** (sobre 100%): 20% cálculos previos, 10% trabajo en el laboratorio, 20% informes de los ensayos, 50% examen práctico final.
- Para aprobar la asignatura se exige una **nota mínima de 5 en teoría y laboratorio**. Si se aprueba una parte y se suspende otra, en el acta figurará la calificación de la parte suspendida y se guardará la calificación de la parte aprobada hasta la convocatoria extraordinaria.

#### Convocatoria Extraordinaria

- **Nota Total:** 65% Teoría + 35% Laboratorio
- **Teoría** (sobre 100%): 30% calificación que obtuvo el alumno en su **evaluación continua** de la teoría (pruebas de seguimiento), 70% examen convocatoria extraordinaria.
- **Laboratorio** (sobre 100%): 50% calificación que obtuvo el alumno en su **evaluación continua** del laboratorio (pruebas de preparación, trabajo en el laboratorio e informes), 50% examen convocatoria extraordinaria.
- Para aprobar la asignatura se exige una nota mínima de 5 en teoría y laboratorio. Si se aprueba una parte y se suspende otra, en el acta figurará la calificación de la parte suspendida. Si se repite la asignatura no se conservará la nota de la parte aprobada si se diera el caso.

## PLAN DE TRABAJO Y CRONOGRAMA

Cada semana puede tener actividades de tres tipos: (1) Trabajo presencial en el aula, (2) Trabajo no presencial y (3) Trabajo presencial en el laboratorio. Dentro del trabajo no presencial, se distinguen 4 tipos de actividades: estudio autónomo de la Teoría (T), resolución de Problemas (P), prácticas de Laboratorio (L) y Repaso y profundización (R).

**Las pruebas de seguimiento de la teoría se han resaltado en negrita.**

Semana	Presencial				No presencial				Total horas
	Aula			Lab.	T	P	L	R	
	Temas	Teo	Prob.						
1	1, 2...	4	2			2		5	13
2	...2...	2	2	2	2	3	2	4	17
3	...2, 3...	2	2	2		2	2	3	13
4	...3...	2	2	2		2	2	4	14
5	...3, 4	3	1	2	4	1	2	4	17
6	5, <b>examen</b>	2	2	2		2	2	3	13
7	6	1	3	2		3	2	3	14
8	7	2	2	2		2	2	3	13
9	...7, 8	2	2	2	4	2	2	3	17
10	<b>examen</b> , 9...	2	2	2		2	2	3	13
11	9	2	2	2		2	2	4	14
12	...9, 10	1	3	2		3	2	2	13
13	(6), repaso	3	1	2	2	1	2	2	13
14	11, 12, 13...	4	0	2		4	3	3	16
15	...13, <b>examen lab.</b>	0	6			6		3	15
Mayo	<b>Examen Teo.</b>						20	35	55
		32	32	26	12	37	47	84	<b>270</b>
		Total Pres. 90		Total No Pres. 180					

Estudio autónomo teoría (T)  
 Resolución de Problemas (P)  
 Prácticas laboratorio (L)  
 Repaso y profundización (R)

## BIBLIOGRAFÍA Y RECURSOS

### Bibliografía Básica

- Novotny D. W., Lipo T. A., *Vector control and dynamics of AC drives*, Oxford University Press, 1996.
- Krause P.C., Wasynczuk O., Sudhoff S. D., *Analysis of electric machinery*, IEEE Press, 1995.

### Bibliografía Complementaria

- Boldea I., Nasar S. A., *Vector control of AC drives*, CRC press, 1992.
- Leonhard W., *Control of Electrical Drives*, Springer-Verlag, 2º ed., 1990.
- Barnes, M., *Practical Variable Speed Drives and Power Electronics*, Elsevier, 2003.

### Portal de recursos de la asignatura en la universidad

- Información general del curso.
- Ejercicios propuestos con solución.
- Transparencias.
- Información general del laboratorio (calendario de prácticas, grupos, etc).
- Guiones de prácticas de laboratorio.
- Problemas de examen con solución.