



## FICHA TÉCNICA DE LA ASIGNATURA

Datos de la asignatura	
Nombre completo	Control de los Sistemas de Energía Eléctrica
Código	DIE-MII-531
Título	<a href="#">Máster Universitario en Ingeniería Industrial por la Universidad Pontificia Comillas</a>
Impartido en	Máster Universitario en Ingeniería Industrial [Primer Curso]
Nivel	Postgrado Oficial Master
Cuatrimestre	Semestral
Créditos	4,5 ECTS
Carácter	Obligatoria
Departamento / Área	Departamento de Ingeniería Eléctrica
Responsable	Luis Rouco Rodríguez
Horario de tutorías	El fijado por cada profesor

Datos del profesorado	
<b>Profesor</b>	
Nombre	Aurelio García Cerrada
Departamento / Área	Departamento de Electrónica, Automática y Comunicaciones
Despacho	Alberto Aguilera 25 [D-218]
Correo electrónico	Aurelio.Garcia@iit.comillas.edu
Teléfono	2421
<b>Profesor</b>	
Nombre	Luis Rouco Rodríguez
Departamento / Área	Departamento de Ingeniería Eléctrica
Despacho	Francisco de Ricci, 3 [D-122]
Correo electrónico	Luis.Rouco@iit.comillas.edu
Teléfono	6109
<b>Profesores de laboratorio</b>	
<b>Profesor</b>	
Nombre	Eduardo Lorenzo Cabrera
Departamento / Área	Departamento de Ingeniería Eléctrica
Correo electrónico	elcabrera@icai.comillas.edu
<b>Profesor</b>	



<b>Nombre</b>	Francisco Javier Renedo Anglada
<b>Departamento / Área</b>	Instituto de Investigación Tecnológica (IIT)
<b>Despacho</b>	Francisco de Ricci, 3
<b>Correo electrónico</b>	Javier.Renedo@iit.comillas.edu
<b>Teléfono</b>	4509

## DATOS ESPECÍFICOS DE LA ASIGNATURA

### Contextualización de la asignatura

#### Aportación al perfil profesional de la titulación

El control de los sistemas de energía eléctrica tiene por misión que las magnitudes del sistema eléctrico se encuentren en los márgenes requeridos no sólo en régimen permanente sino también en régimen dinámico. Por ello, la estabilidad del sistema debe ser abordada.

Este curso aborda el problema del control de los sistemas de energía eléctrica actuales que incluyen equipos y sistemas basados en convertidores electrónicos de potencia: los dispositivos FACTS y los sistemas de transporte en corriente continua.

Los sistemas eléctricos en corriente alterna están gobernados por las leyes de Kirchoff y por ello los flujos de potencia poco controlables. Los dispositivos FACTS (acrónimo de la expresión inglesa Flexible AC Transmission Systems) son dispositivos electrónicos de potencia han sido concebidos para hacer más flexible la operación de los sistemas eléctricos en corriente alterna. Este curso presenta los principios y topologías de los dispositivos FACTS.

El transporte en corriente continua es necesario cuando se desea transportar grandes potencias a largas distancias o cuando se han de utilizar cables aislados (subterráneos o submarinos) en lugar de líneas aéreas. Este curso mostrará los principios de las dos tecnologías existentes: convertidores conmutados por la línea y convertidores fuentes de tensión.

Este curso presta atención a estos sistemas no sólo desde el punto de vista de dispositivo sino también desde la perspectiva de su contribución al control en régimen permanente (flujo de cargas) y en régimen dinámico (estabilidad) del sistema.

#### Prerequisitos

Conocimientos de sistemas eléctricos.

### Competencias - Objetivos

#### Competencias

#### GENERALES



<b>BA04</b>	Ser capaces de predecir y controlar la evolución de situaciones complejas mediante el desarrollo de nuevas e innovadoras metodologías de trabajo adaptadas al ámbito científico/investigador, tecnológico o profesional concreto, en general multidisciplinar, en el que se desarrolle su actividad.
<b>BA06</b>	Haber desarrollado la autonomía suficiente para participar en proyectos de investigación y colaboraciones científicas o tecnológicas dentro su ámbito temático, en contextos interdisciplinares y, en su caso, con una alta componente de transferencia del conocimiento
<b>CG01</b>	Tener conocimientos adecuados de los aspectos científicos y tecnológicos de: métodos matemáticos, analíticos y numéricos en la ingeniería, ingeniería eléctrica, ingeniería energética, ingeniería química, ingeniería mecánica, mecánica de medios continuos, electrónica industrial, automática, fabricación, materiales, métodos cuantitativos de gestión, informática industrial, urbanismo, infraestructuras, etc.
<b>CG04</b>	Realizar investigación, desarrollo e innovación en productos, procesos y métodos
<b>ESPECÍFICAS</b>	
<b>CMIO1</b>	Capacidad para el diseño, construcción y explotación de plantas industriales
<b>CMT01</b>	Conocimiento y capacidad para el análisis y diseño de sistemas de generación, transporte y distribución de energía eléctrica

## Resultados de Aprendizaje

<b>RA01</b>	Conocer las necesidades de control de los actuales sistemas eléctricos caracterizados por la masiva presencia de generación intermitente y dificultad de construcción de nuevas instalaciones de transporte
<b>RA02</b>	Conocer los modernos métodos de control de los sistemas eléctricos basados en dispositivos electrónicos de potencia (dispositivos FACTS y enlaces en corriente continua).
<b>RA03</b>	Conocer los principios de funcionamiento de los dispositivos FACTS
<b>RA04</b>	Plantear y resolver flujos de cargas con elementos de control.
<b>RA05</b>	Realizar análisis de seguridad. Analizar el impacto de contingencias y determinar acciones correctivas
<b>RA06</b>	Plantear y resolver flujos de cargas y flujos de cargas óptimos con dispositivos FACTS
<b>RA07</b>	Plantear el problema de estabilidad de sistemas eléctricos. Analizar la estabilidad de gran y pequeña perturbación de un generador síncrono conectado a un nudo de potencia
<b>RA08</b>	Valorar la mejora de la estabilidad con dispositivos FACTS



<b>RA09</b>	Conocer los principios de funcionamiento de los enlaces en corriente continua
<b>RA10</b>	Plantear y resolver flujos de cargas y flujos de cargas óptimos con enlaces en corriente continua
<b>RA11</b>	Valorar la mejora de la estabilidad con enlaces en corriente continua

## BLOQUES TEMÁTICOS Y CONTENIDOS

<b>Contenidos – Bloques Temáticos</b>	
<b>Teoría</b>	
Tema 1. Flujos de potencia en sistemas en corriente alterna	
Compensación serie y paralelo. Transporte en corriente alterna frente a transporte en corriente continua.	
Tema 2. Revisión de los interruptores de estado sólido	
Dispositivos conmutados por la línea frente a dispositivos autoconmutados. Limitaciones de los dispositivos de silicio. Nuevas alternativas.	
Tema 3. Dispositivos FACTS conmutados por la línea	
Reactancia controlada por tiristores. Condensador conmutado por tiristores. Compensador estático de potencia reactiva (static var compensator, SVC). Condensador serie controlado por tiristores.	
Tema 4. Dispositivos FACTS autoconmutados	
Convertidores fuente de tensión: control de tensión y de corriente, control del flujo de potencia. Condensador síncrono estático (STATic -synchronous- COMPensator, STATCOM). El STATCOM frente al SVC. Fuente serie síncrona estática (Static Series Synchronous Compensator, SSSC). Compensador paralelo y serie: el controlador unificado del flujo de potencia (Unified Power Flow Controller, UPFC).	
Tema 5. Flujo de cargas con elementos de control.	
Transformador con tomas. Transformador desfasador. Áreas de intercambio.	
Tema 6. Flujo de cargas óptimo	
Planteamiento del problema: funciones objetivo, restricciones de igualdad y de desigualdad. Métodos de solución	
Tema 7. Análisis de seguridad	
Análisis de contingencias. Determinación de acciones correctivas.	
Tema 8. Flujo de cargas con dispositivos FACTS	



Dispositivos paralelo. Dispositivos serie. Dispositivos híbridos.

## Tema 9. Estabilidad

Estabilidad de gran perturbación de un generador síncrono conectado a un nudo de potencia infinita.  
Estabilidad de pequeña perturbación.

## Tema 10. Mejora de la estabilidad con dispositivos FACTS

Mejora de la estabilidad de gran perturbación con dispositivos FACTS shunt y serie. Mejora de la estabilidad de pequeña perturbación con dispositivos FACTS shunt y serie.

## Tema 11. Enlaces en corriente continua conmutados por la línea

Principios. Control del flujo de potencia en corriente continua. Requisitos de potencia reactiva. Armónicos de corriente. Topologías típicas.

## Tema 12. Enlaces en corriente continua autoconmutados

Principios. Control del flujo de potencia en corriente continua. Requisitos de potencia reactiva. Armónicos de corriente. Topologías típicas: desde convertidores en dos niveles a convertidores multi-nivel.

## Tema 13. Flujo de cargas con enlaces en corriente continua

Enlaces en corriente continua conmutados por la línea. Enlaces en corriente continua autoconmutados.

## Tema 14. Mejora de la estabilidad con enlaces en corriente continua

Mejora de la estabilidad de gran perturbación con enlaces en corriente continua conmutados por la línea y autoconmutados. Mejora de la estabilidad de pequeña perturbación con enlaces en corriente continua conmutados por la línea y autoconmutados

## Laboratorio

### Práctica 1. Simulación dinámica en Simulink de un STATCOM

Modelado y simulación de un STATCOM en la herramienta Matlab + Simulink. Lazos de control. Análisis del comportamiento de un STATCOM.

### Práctica 2: Flujo de cargas con elementos de control

Flujo de cargas con STATCOM. Flujo de cargas con transformador desfasador. Flujo de cargas con fuente serie.

### Práctica 3: Simulación dinámica de sistemas eléctricos en PSS/E

Pasos de la simulación dinámica de sistemas eléctricos en PSS/E. Automatización de la simulación dinámica de sistemas eléctricos en PSS/E con Python.



### Práctica 4: Simulación dinámica de FACTS con PSS/E

Modelado de un STATCOM en la herramienta PSS/E. Parámetros del modelo dinámico. Caso ejemplo. Resultados.

### Práctica 5: Flujo de cargas con HVDC

Incorporación de sistemas HVDC en el flujo de cargas de la herramienta PSS/E. Tecnologías LCC-HVDC y VSC-HVDC. Casos ejemplos. Resultados: tensiones, flujos de potencia.

### Práctica 6: Simulación dinámica de HVDC con PSS/E

Modelado de un enlace VSC-HVDC en la herramienta PSS/E. Parámetros del modelo dinámico. Caso ejemplo. Resultados.

## METODOLOGÍA DOCENTE

### Aspectos metodológicos generales de la asignatura

#### 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. Se podría realizar la visita técnica a las instalaciones del Operador del Mercado o del Operador del sistema en función del desarrollo del curso.
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. 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.
4. Prácticas de laboratorio. Se asignará a los alumnos a grupos de trabajo que tendrán que realizar prácticas de laboratorio regladas. Las prácticas de laboratorio finalizarán 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 y resolución de problemas prácticos fuera del horario de clase por parte del alumno: El alumno debe utilizar e interiorizar los conocimientos aportados en la materia. La corrección a 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).
2. 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, y la búsqueda de la información relevante pertinente.
3. Prácticas de laboratorio. Se asignará a los alumnos a grupos de trabajo que tendrán que realizar prácticas de laboratorio regladas. Las prácticas de laboratorio finalizarán con la redacción de un



informe de laboratorio o la inclusión de las distintas experiencias en un cuaderno de laboratorio.

## RESUMEN HORAS DE TRABAJO DEL ALUMNO

HORAS PRESENCIALES			
Clase magistral y presentaciones generales	Resolución grupal de problemas	Resolución en clase de problemas prácticos	Prácticas de laboratorio
20.00	5.00	8.00	12.00
HORAS NO PRESENCIALES			
Trabajos de carácter práctico individual	Prácticas de laboratorio	Estudio y resolución de problemas prácticos fuera del horario de clase por parte del alumno	
40.00	15.00	35.00	
<b>CRÉDITOS ECTS: 4,5 (135,00 horas)</b>			

## EVALUACIÓN Y CRITERIOS DE CALIFICACIÓN

Actividades de evaluación	Criterios de evaluación	Peso
Exámenes	<ol style="list-style-type: none"><li>Pruebas tipo problema o caso práctico. Se valorará tanto el procedimiento elegido para la resolución del problema, como los resultados numéricos, que, aunque pudieran ser incorrectos, han de ser coherentes y lógicos.</li><li>Pruebas tipo test. Identificación de la respuesta correcta dentro de una serie limitada de alternativas.</li></ol>	75
Evaluación del rendimiento	<ol style="list-style-type: none"><li>Trabajos de carácter práctico individual.</li><li>Informes o cuadernos de laboratorio. También se valorará la preparación previa de las prácticas de laboratorio.</li></ol>	25

### Calificaciones

Convocatoria ordinaria:

- Nota Total: 75% Teoría + 25% Laboratorio
- Teoría (sobre 100%):
  - 30% evaluación continua
  - 70% examen final



- Laboratorio (sobre 100%):
  - 70% evaluación continua
  - 30% examen 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. No se conservará la nota de la parte aprobada si se diera el caso.

Convocatoria extraordinaria:

- Nota Total: 75% Teoría + 25% Laboratorio
- Teoría (sobre 100%):
  - 30% evaluación continua
  - 70% examen final
- Laboratorio (sobre 100%):
  - 70% evaluación continua
  - 30% examen final
- Para aprobar la asignatura se exige una nota mínima de 5 en teoría y laboratorio.

## BIBLIOGRAFÍA Y RECURSOS

### Bibliografía Básica

- P. Kundur, Power System Stability and Control. Mc Graw Hill, 1993.
- N.G. Hingorani and L. Gyugui. Understanding FACTS. Concepts and technology of flexible AC transmission systems, IEEE Press. 1999

### Bibliografía Complementaria

- P. García Gonzalez and A. García Cerrada. Transporte flexible de la energía eléctrica en corriente alterna. Anales de Mecánica y Electricidad, Nov-Dic. 2004. pp 59-66.
- A. Yazdani and R. Iravani. Voltage-Sourced Converters in Power Systems. Wiley-IEEE Press, 2010.
- N.R.Chaudhuri, B. Chaudhuri, R. Majumder and A. Yazdani. Multi-terminal Direct-Current Grids: modelling, analysis and Control. Wiley-IEEE Press, 2014.

En cumplimiento de la normativa vigente en materia de **protección de datos de carácter personal**, le informamos y recordamos que puede consultar los aspectos relativos a privacidad y protección de datos que ha aceptado en su matrícula entrando en esta web y pulsando "descargar"

[https://servicios.upcomillas.es/sedelectronica/inicio.aspx?csv=02E4557CAA66F4A81663AD10CED66792](https://servicios.upcomillas.es/sedeelectronica/inicio.aspx?csv=02E4557CAA66F4A81663AD10CED66792)



		ACTIVIDADES EN CLASE			ACTIVIDADES FUERA DE CLASE				RESULTADOS DE APRENDIZAJE
Semana	h	CLASES Y SOLUCIÓN DE PROBLEMAS	LABORATORIO	EVALUACIÓN	h	ESTUDIO	PREPARACIÓN DE LABORATORIO Y ELABORACIÓN DE INFORMES	OTRAS ACTIVIDADES	RESULTADOS
1	2	Introducción			2	Revisión, estudio y realización de problemas			LO1
1	1	Revisión de los interruptores de estado sólido.			1	Revisión y estudio			LO2, LO3
2	1	Dispositivos FACTS conmutados por la línea			1				LO2
2	2	Dispositivos FACTS conmutados por la línea			2	Revisión y estudio			LO2
3	2	Dispositivos FACTS autoconmutados			2	Revisión y estudio			LO3
3	1	Flujo de cargas con elementos de control			1	Revisión, estudio y realización de problemas			LO4
4	1	Flujo de cargas óptimo			1	Revisión y estudio			LO4
4	2		Práctica 1. Simulación dinámica en Simulink de un STATCOM		2			Preparación de la práctica de laboratorio y realización informe de laboratorio	LO3
5	1	Análisis de seguridad			1	Revisión, estudio y realización de problemas			LO5
5	1	Flujo de cargas con dispositivos FACTS			1	Revisión, estudio y realización de problemas			LO4
5	1	Flujo de cargas con dispositivos FACTS			1	Revisión, estudio y realización de problemas			LO6
6	1	Estabilidad			1	Revisión, estudio y realización de problemas			LO7
6	2		Práctica 2: Flujo de cargas con elementos de control		2			Preparación de la práctica de laboratorio y realización informe de laboratorio	LO4
7	2	Estabilidad			2	Revisión, estudio y realización de problemas			LO7
7	1	Mejora de la estabilidad con dispositivos FACTS			1	Revisión, estudio y realización de problemas			LO8
8	3			Examen intermedio	3	Revisión, estudio y realización de problemas			
9	1	Mejora de la estabilidad con dispositivos FACTS			1	Revisión, estudio y realización de problemas			LO8
9	2		Práctica 3: Simulación dinámica de sistemas eléctricos en PSS/E		2			Preparación de la práctica de laboratorio y realización informe de laboratorio	LO7
10	3	Enlaces en corriente continua conmutados por la línea. Principios.			3	Revisión y estudio			
11	1	Enlaces en corriente continua autoconmutados			1	Revisión y estudio			
11	2		Práctica 4: Simulación dinámica de FACTS con PSS/E		2			Preparación de la práctica de laboratorio y realización informe de laboratorio	LO5
12	2	Enlaces en corriente continua autoconmutados			2	Revisión y estudio			LO9
12	1	Flujo de cargas con enlaces en corriente continua			1	Revisión, estudio y realización de problemas			LO9
13	1	Flujo de cargas con enlaces en corriente continua			1	Revisión, estudio y realización de problemas			LO10
13	2		Práctica 5: Flujo de cargas con HVDC		2			Preparación de la práctica de laboratorio y realización informe de laboratorio	LO10
14	1	Flujo de cargas con enlaces en corriente continua			1	Revisión, estudio y realización de problemas			LO10
14	2	Mejora de la estabilidad con enlaces en corriente continua. Mejora de la			2	Revisión, estudio y realización de problemas			LO11
15	1			Examen final de laboratorio	1	Revisión, estudio y realización de ejercicios de simulación			
15	2			Examen final	2	Revisión, estudio y realización de problemas			