

## 67229 - Modelado y control de sistemas electrónicos de potencia

### Información del Plan Docente

<b>Año académico</b>	2016/17
<b>Centro académico</b>	110 - Escuela de Ingeniería y Arquitectura
<b>Titulación</b>	527 - Máster Universitario en Ingeniería Electrónica
<b>Créditos</b>	5.0
<b>Curso</b>	1
<b>Periodo de impartición</b>	Primer Semestre
<b>Clase de asignatura</b>	Optativa
<b>Módulo</b>	---

### 1. Información Básica

#### 1.1. Recomendaciones para cursar esta asignatura

Se recomienda estar cursando o haber cursado la asignatura obligatoria "Sistemas Electrónicos Avanzados". Además se recomienda tener conocimientos de

- Electrónica analógica
- Electrónica industrial
- Electrónica de potencia

El estudio y trabajo continuado son muy recomendables para superar con el máximo aprovechamiento la asignatura.

#### 1.2. Actividades y fechas clave de la asignatura

El calendario detallado de las diversas actividades a desarrollar se establecerá una vez que la Universidad y el Centro hayan aprobado el calendario académico (el cual podrá ser consultado en la página web del centro).

A título orientativo:

- **Período de clases** : primer cuatrimestre (Otoño).
- **Clases de teoría y problemas-casos** : cada semana hay programadas clases de teoría y/o problemas-casos en el aula.
- **Sesiones prácticas de laboratorio** : el estudiante realizará sesiones prácticas de laboratorio y entregará trabajos asociados a las mismas.
- **Entrega de trabajos** : se informará adecuadamente en clase de las fechas y condiciones de entrega.
- **Examen** : habrá un examen de 1ª convocatoria y otro de 2ª convocatoria en las fechas concretas que indique el centro.

Toda la información y documentación sobre la asignatura se publicará en <http://moodle.unizar.es/> (Para acceder a esta página web se requiere que el estudiante esté matriculado).

### 2. Inicio

#### 2.1. Resultados de aprendizaje que definen la asignatura

## 67229 - Modelado y control de sistemas electrónicos de potencia

El estudiante, para superar esta asignatura, deberá demostrar los siguientes resultados...

- Conoce y es capaz de diferenciar modelos de gran señal, modelos promediados y modelos linealizados de los sistemas de potencia.
- Es capaz de obtener los modelos dinámicos de los de convertidores electrónicos de potencia
- Conoce los métodos de modelado de promediado en el espacio de estado, promediado del circuito y promediado del interruptor. Sabe obtener del modelo canónico de circuito
- Sabe obtener la función de transferencia. Sabe analizar las funciones de transferencia obtenidas.
- Conoce el teorema general de la realimentación de Middlebrook y sabe aplicarlo en los modelos de simulación,
- Conoce el teorema del elemento Extra de Middlebrook y sabe aplicarlo a par obtener funciones de transferencia complejas.
- Es capaz de obtener modelos SPICE y Matlab/simulink de sistemas electrónicos conmutados.

### 2.2.Introducción

Breve presentación de la asignatura

Modelado y control de sistemas electrónicos de potencia es una asignatura que forma parte de la materia optativa Electrónica para sistemas de potencia del Máster Universitario en Ingeniería Electrónica. Es una asignatura de 5 créditos ECTS que equivalen a 125 horas totales de trabajo del estudiante.

La asignatura se centra en la extracción de modelos de pequeña señal de las etapas de electrónica de potencia que trabajan en conmutación. Además se le introduce al alumno en las herramientas de simulación y se le explican y se les enseña a utilizar dos teoremas que facilitan el modelado de circuitos complejos, como son el teorema del elemento extra de Middlebrook y el teorema general de la realimentación de Middlebrook.

Las practicas de laboratorio inciden sobre los conocimientos adquiridos y muestran como se simulan los modelos.

Teniendo en cuenta que el ámbito de la asignatura es un máster de investigación, se tratarán temas teóricos y se trabajará con herramientas avanzadas que permitan abordar con garantías la realización de una tesis doctoral en el ámbito de los sistemas electrónicos de potencia.

### 3.Contexto y competencias

#### 3.1.Objetivos

La asignatura y sus resultados previstos responden a los siguientes planteamientos y objetivos:

El objetivo de la asignatura es formar al alumno en los fundamentos del diseño de sistemas para aplicaciones de electrónica de potencia y en el conocimiento de las técnicas de análisis, simulación y principales ámbitos en que se aplican estos sistemas.

#### 3.2.Contexto y sentido de la asignatura en la titulación

Esta asignatura se enmarca dentro de la materia optativa "Electrónica para sistemas de potencia" del máster. En el contexto actual: los sistemas electrónicos de gran potencia juegan un papel determinante en la optimización y mejora de los sistemas que gestionan la energía eléctrica y es una de las tecnologías clave que permitirá alcanzar los objetivos de Kioto. Los sistemas electrónicos de gran potencia están presentes en aerogeneradores, tracción ferroviaria, propulsión naval, generación hidráulica, interconexión de redes eléctricas, industria pesada (acerías, cementeras, papeleras, etc...), etc... Por todo ello prácticamente todos los programas de I+D+I promovidos por las diferentes instituciones identifican la

## 67229 - Modelado y control de sistemas electrónicos de potencia

Electrónica de Potencia como una de las tecnologías clave en el desarrollo sostenible del futuro. El vehículo eléctrico y la conversión energética requerida en nano-redes es otro campo donde la electrónica de potencia juega un papel relevante.

### 3.3.Competencias

Al superar la asignatura, el estudiante será más competente para...

#### COMPETENCIAS BÁSICAS:

CB6. Poseer y comprender conocimientos que aporten una base u oportunidad de ser originales en el desarrollo y/o aplicación de ideas, a menudo en un contexto de investigación.

CB7. Que los estudiantes sepan aplicar los conocimientos adquiridos y su capacidad de resolución de problemas en entornos nuevos o poco conocidos dentro de contextos más amplios (o multidisciplinares) relacionados con su área de estudio.

CB10. Que los estudiantes posean las habilidades de aprendizaje que les permitan continuar estudiando de un modo que habrá de ser en gran medida auto dirigido o autónomo.

#### COMPETENCIAS GENERALES:

CG1. Capacidad para el modelado físico-matemático, cálculo y simulación en centros tecnológicos y de ingeniería, particularmente en tareas de investigación, desarrollo e innovación en ámbitos relacionados con la Ingeniería Electrónica y campos multidisciplinares afines.

CG2. Capacidad para proyectar y diseñar productos, procesos e instalaciones en el ámbito de la Ingeniería Electrónica.

CG4. Capacidad para abordar con garantías la realización de una tesis doctoral en el ámbito de la Ingeniería Electrónica.

#### COMPETENCIAS ESPECÍFICAS:

CE3. Capacidad de analizar y diseñar componentes y sistemas electrónicos de potencia avanzados para el procesamiento de energía con alta eficiencia.

CE4. Capacidad de especificar, caracterizar y diseñar componentes y sistemas electrónicos complejos en aplicaciones industriales y domésticas.

### 3.4.Importancia de los resultados de aprendizaje

Los conocimientos, aptitudes y habilidades adquiridos a través de esta asignatura, junto con los del resto del Máster en Ingeniería Electrónica, deben permitir al estudiante desarrollar las competencias anteriormente expuestas, así como abordar con garantías la realización de una tesis doctoral en el ámbito del diseño de sistemas electrónicos potencia, o desempeñar adecuadamente una labor profesional en el mencionado ámbito.

### 4.Evaluación

El estudiante deberá demostrar que ha alcanzado los resultados de aprendizaje previstos mediante las siguientes actividades de evaluación

## 67229 - Modelado y control de sistemas electrónicos de potencia

- Trabajos T6: 8 trabajos semanales (45%). Se recogen en las semanas 3, 4, 5, 6 y 7, el primer tramo, y las semanas 10, 12 y 13, para el segundo tramo.
- Examen (7 días, en casa) de medio curso sobre el tema de los trabajos 1 a 4 (17%). Se realiza en la semana 8
- Examen (4 días, en casa) de final de curso sobre el tema de los trabajos 1 a 8 (33%). Se realiza en la semana 14
- Exposición de problemas en clase (5%). Son problemas seleccionados en el libro de problemas recomendado en la bibliografía. Se realizan en las semanas 8, 9, 10 y 11

### 5. Actividades y recursos

#### 5.1. Presentación metodológica general

El proceso de aprendizaje que se ha diseñado para esta asignatura se basa en lo siguiente:

El proceso de enseñanza se desarrollará en tres niveles principales: clases de teoría, problemas y laboratorio, con creciente participación del estudiante.

- En las clases de teoría se expondrán las bases teóricas del modelado y control de sistemas electrónicos de potencia.
- En las clases de problemas se desarrollarán problemas y diseños representativos con la participación de los estudiantes.
- Se realizarán prácticas de laboratorio en grupos reducidos en las que se realizarán simulaciones y trabajos experimentales relacionados con los temas desarrollados en clase.

#### 5.2. Actividades de aprendizaje

Las actividades de aprendizaje previstas en esta asignatura son las siguientes:

##### Actividades presenciales (2 ECTS, 50 horas) :

A01 Clase magistral (22 horas)

En esta actividad se expondrán los contenidos fundamentales de la materia y se realizarán un conjunto de problemas representativos. Esta actividad se realizará en el aula de forma presencial. Los materiales que se expondrán en las clases magistrales estarán a disposición de los alumnos a través del Anillo Digital Docente.

A02 Resolución de problemas y casos (4 horas)

En esta actividad se resolverá un conjunto de problemas representativos. Esta actividad se realizará en el aula de forma presencial. Los materiales que se expondrán en las clases magistrales estarán a disposición de los alumnos a través del Anillo Digital Docente

A03 Prácticas de laboratorio (15 horas)

Las prácticas están estructuradas en 5 sesiones de 3 horas cada una. Los enunciados de las prácticas estarán a disposición de los alumnos a en el Anillo Digital Docente.

## 67229 - Modelado y control de sistemas electrónicos de potencia

A06 Tutela de trabajos (9 horas)

Tutela personalizada profesor-estudiante para los trabajos docentes.

### Actividades no presenciales (3 ECTS, 75 horas):

A06 Trabajos docentes (20 horas)

En esta actividad se realizarán los trabajos semanales que se recogen a la semana siguiente. También con la preparación de los problemas a exponer en clase.

A07 Estudio (35 horas)

Esta actividad comprende tanto el estudio personal encaminado a lograr el seguimiento adecuado de la asignatura, la realización de las prácticas, la preparación del examen y las tutorías

A08 Pruebas de evaluación (20 horas)

10 Examen en casa sobre los temas 1-5

10 Examen en casa temas 1-8

### 5.3.Programa

**El programa por temas que se propone para alcanzar los resultados de aprendizaje previstos es el siguiente:**

- T1. Introducción y herramientas de simulación.
- T2. Modelado promediado de la red de conmutación en MCC.
- T3: Teorema del Elemento Extra de Middlebrook.
- T4: Teorema general de la Realimentación de Middlebrook.
- T5: Circuito equivalente DC y AC en modo discontinuo.

## 67229 - Modelado y control de sistemas electrónicos de potencia

- T6: Control en modo corriente: pico y promedio.

Los contenidos que se desarrollan en los trabajos semanales son los siguientes:

### **Trabajo Semanal 1: Problemas sobre el modelado promedio del interruptor**

- Hacer los problemas 7.15 y 7.16 del libro de texto. Se recomienda leer antes la sección 7.4.
- Problemas de simulink. Usar la simulación para resolver lo siguiente:
  - Impedancia de salida del convertidor Buck en lazo cerrado.
  - Función de transferencia control-salida del convertidor buck-boost.

### **Trabajo Semanal 2: Aplicación del Teorema del Elemento Extra de Middlebrook para obtener funciones de transferencia complejas.**

Hacer los problemas adjuntos:

- Efecto de la resistencia equivalente serie ESR de un condensador en la función de transferencia.
- Análisis la función de transferencia control-salida de convertidor buck-boost en CCM haciendo uso del teorema del elemento extra.

### **Trabajo Semanal 3: Aplicación del Teorema del Elemento Extra de Middlebrook para analizar circuitos.**

- Análisis y diseño de un SEPIC en modo de conducción continuo.
- Análisis de un convertidor flyback con filtro de entrada.

### **Trabajo Semanal 4: Aplicación del Teorema del Elemento-N Extra de Middlebrook para obtener funciones de transferencia de forma directa.**

## 67229 - Modelado y control de sistemas electrónicos de potencia

- Impedancia de del Filtro de entrada L-C amortiguado.
- Etapa Boost en modo de conducción continuo. Cálculo de Gvd(s).

### Trabajo Semanal 5: Teorema de la realimentación y simulación del lazo cerrado.

Hacer los problemas adjuntos:

- Uso del teorema de la realimentación para analizar un amplificador de transconductancia.
- simulación de una etapa SEPIC en lazo cerrado.

### Trabajo Semanal 6: Modo de conducción discontinuo .

Hacer los problemas adjuntos:

- Problema 11.3.
- Problema 11.4.
- Problema 11.6.
- Añadir al 11.6 (d): modificar la respuesta del apartado (c) teniendo en cuenta la dinámica de la bobina a alta frecuencia.
- Simular el problema adjunto: Flyback en modo de conducción discontinuo.

### Trabajo Semanal 7: Control modo corriente.

Hacer los problemas adjuntos:

- Problema 12.2 del libro de texto.
-

## 67229 - Modelado y control de sistemas electrónicos de potencia

Diseño del compensador de un convertidor buck trabajando en modo corriente usando el modelo simplificado.

### Trabajo Semanal 8: Control modo corriente, modelo de alta frecuencia.

Análisis y simulación de un regulador CPM.

- Evaluación del diseño del compensador.
- Simulación de la etapa.
- Rediseño del compensador usando el modelo exacto.
- respuesta a un escalón de la corriente de carga.

Los contenidos que se desarrollan en los problemas son los siguientes:

- 1 Problema 6.45 Modelado y control de un convertidor buck
- 2 Problema 6.46 Modelado y control de un convertidor buck bidireccional
- 3 Problema 6.48 Modelado y control de un convertidor boost
- 4 Problema 6.49 Modelado y control de un convertidor flyback

### 5.4. Planificación y calendario

#### Calendario de sesiones presenciales y presentación de trabajos.

Las clases magistrales y de problemas y las sesiones de prácticas en el laboratorio se imparten según horario establecido por el centro (horarios disponibles en su página web). El resto de actividades se planificará en función del número de alumnos y se dará a conocer con la suficiente antelación.

#### Semana 1:

#### Introducción.



## 67229 - Modelado y control de sistemas electrónicos de potencia

- Ficha de la asignatura.
- Presentación de ideas.

### Herramientas de Simulación.

- Tutorial de Matlab/Simulink (en el laboratorio BSH 4).
- Tutorial de LTSpice.
- Descarga de LTSpice, Guía de usuario y materiales suplementarios.

### Semana 2:

#### Modelo promediado del interruptor.

- Sección 7.4 y apéndice B.
- Obtención de los modelos de pequeña señal de los convertidores mediante el promediado de los elementos de conmutación.
- Objetivos de la simulación.
- Simulación del comportamiento de pequeña señal del convertidor utilizando el modelo promediado del interruptor.
- Esquemas de convertidores aislados.

#### Técnicas de análisis orientadas al diseño, aplicación a convertidores conmutados.

- Teorema del Elemento Extra de Middlebrook ( Apéndice C).
- Uso de la doble inyección para encontrar el efecto de añadir un elemento al convertidor sobre la función de transferencia.

### Semana 3:

- Teorema del Elemento Extra de Middlebrook ( Apéndice C).
- Función de transferencia de la etapa SEPIC. Análisis de las Impedancias  $Z_d$ .

## 67229 - Modelado y control de sistemas electrónicos de potencia

- Trabajo semanal #1.

### Semana 4:

- Teorema del Elemento Extra de Middlebrook ( Apéndice C).
- Función de transferencia de la etapa SEPIC. Análisis de las Impedancias  $Z_n$ .
- Trabajo semanal #2.

### Semana 5:

- Teorema del Elemento n-Extra de Middlebrook.
- Trabajo semanal #3.
- Practica 1.

### Semana 6:

- Teorema de la realimentación de Middlebrook.
- Punto de medida de la función de transferencia.
- Análisis de circuitos realimentados usando la técnica de la doble inyección.
- Ejemplos.
- Trabajo semanal #4.

### Semana 7:

- Modelo dinámico y de simulación de convertidores operando en modo de conducción discontinuo.
- Capítulo 11 y Apéndice B.
- Función de transferencia de la etapa SEPIC. Análisis de las Impedancias  $Z_n$  y  $Z_d$ .
-

## 67229 - Modelado y control de sistemas electrónicos de potencia

Trabajo semanal #5.

- Practica 2.

### Semana 8:

- Influencia del cambio del modo de operación en la función de transferencia.
- Introducción al control modo corriente.
- Examen en casa durante una semana de los temas 1-4.
- Presentación del problema 6.45 por los alumnos.

### Semana 9:

- Control modo corriente.
- Presentación del problema 6.46 por los alumnos.
- Practica 3.

### Semana 10:

- Control modo corriente. Cap 12 y Apéndice B.
- Rampa de compensación.
- Presentación del problema 6.48 por los alumnos.
- Trabajo semanal #6.

### Semana 11:

- Control modo corriente. Modelo muestreado.
- Muestreador de grado cero. Función de transferencia.
- Simulación.

## 67229 - Modelado y control de sistemas electrónicos de potencia

- Efecto del control modo corriente en la función de transferencia.
- Presentación del problema 6.49 por los alumnos.
- Trabajo semanal #7.

### Semana 12:

- Control modo corriente.
- Trabajo semanal #8.

### Semana 13:

- Control modo corriente. Modelo de Tan.

### Semana 14:

- Examen en casa durante cuatro días de los temas 1-8.

### 5.5. Bibliografía y recursos recomendados

- Erickson, Robert W.. Fundamentals of power electronics / Robert W. Erickson, Dragan Maksimovic . - 2nd ed., 6th print. New York : Springer, 2004
- Problemas de electrónica de potencia / coordinación y revisión técnica Andrés Barrado Bautista, Antonio Lázaro Blanco . - [Reimp.] Madrid [etc.] : Pearson Educación, D.L. 2012