



<b>Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de Cuyo</b>			
<b>P1- PROGRAMA DE ASIGNATURA</b>			
<b>Asignatura:</b>	<b>Automática y Máquinas Eléctricas</b>		
<b>Profesor Titular:</b>	<b>Ing. Gabriel Luis Julián</b>		
<b>Carrera:</b>	<b>Ingeniería en Mecatrónica</b>		
<b>Año: 2019</b>	<b>Semestre: 8°</b>	<b>Horas Semestre: 60</b>	<b>Horas Semana: 4</b>

## OBJETIVOS

**Automática y Máquinas Eléctricas** es una asignatura multidisciplinaria que tiene por objeto el estudio de la teoría y práctica del *control automático* de sistemas dinámicos físicos con aplicación específica a los *accionamientos electromecánicos*, incluyendo su modelado, análisis y diseño de controladores, fundamentalmente desde el enfoque del espacio de estado, en el dominio del tiempo.

Para ello, como **objetivos** específicos se busca que los alumnos alcancen los siguientes logros:

- Introducirse en el control de los sistemas dinámicos lineales, de tiempo continuo y tiempo discreto, utilizando la representación por variables de estado.
- Analizar y simular el comportamiento de sistemas de conversión de energía eléctrica-mecánica y sus lazos de regulación y control.

## CONTENIDOS

### UNIDAD 1: INTRODUCCIÓN: CONVERSIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA-MECÁNICA Y CONTROL AUTOMÁTICO

**Objetivo:** Presentar el panorama general de aplicaciones, tecnologías y principios básicos involucrados en el control automático de accionamientos electromecánicos.

- Introducción** y motivación. Control automático electrónico de máquinas eléctricas: concepto y esquema general, componentes. **Aplicaciones** mecatrónicas: control de movimientos y eficiencia energética (robótica y máquinas-herramienta, manipulación y movimiento de materiales, transporte y vehículos eléctricos, generación de energía, bombas y ventiladores, fabricación industrial, productos de consumo masivo, etc.).
- Fundamentos** y revisión de conceptos básicos: **Accionamientos eléctricos** (tipos de cargas mecánicas; máquinas eléctricas y convertidores electrónicos de potencia: tipos, principios, dispositivos). **Control Automático** (tipos: lazo abierto o cerrado, analógico o digital; objetivos de control y especificación de requisitos: estabilidad, desempeño - seguimiento de comandos, rechazo de perturbaciones, robustez; acciones básicas PID). **Control de Accionamientos eléctricos CC/CA** (velocidad, posición, torque, potencia).
- Proceso de **Conversión de Energía:** eléctrica-eléctrica (convertidores electrónicos) y eléctrica-mecánica (máquinas eléctricas). Circuitos magnéticos y eléctricos acoplados.

### UNIDAD 2: MODELADO Y ANÁLISIS EN EL ESPACIO DE ESTADO DE SISTEMAS DINÁMICOS ELÉCTRICOS Y MECÁNICOS

**Objetivo:** Plantear modelos dinámicos lineales de distintos sistemas físicos eléctricos y mecánicos, y analizar su comportamiento y propiedades, desde el enfoque del espacio de estado.

- Sistemas dinámicos** físicos: concepto de estado interno, orden del sistema; entradas (manipuladas y de perturbación), salidas: sistemas SISO vs. MIMO o multivariantes (MV). Modelado y representación mediante **Variables de Estado:** ecuación de estado; diagrama de bloques de estado. Espacio de estado, trayectorias. Sistemas Lineales vs. No Lineales. Linealización Jacobiana en Puntos de Operación. Espacio de Operación. Modelos lineales con parámetros variables (LPV).
- Modelos lineales invariantes (LTI):** propiedades. Solución de la ecuación de estado. Autovalores, polos y ceros. Función de transferencia a partir del modelo de



estado. Modelos para sistemas interconectados en serie, paralelo y realimentados. Modelos de 1°, 2°, 3° orden, orden superior: ejemplos y **aplicaciones** a subsistemas eléctricos y mecánicos en accionamientos.

- C. Sistemas LTI, modelos en Tiempo Continuo vs. Tiempo Discreto. Efectos de retardos. **Discretización** de sistemas continuos. Sistemas de datos muestreados. Efectos del cambio del período de muestreo.
- D. **Respuesta Dinámica** natural y forzada, resonancia. Simulación numérica. Análisis en el espacio de estado. **Estabilidad** de sistemas desde el enfoque del espacio de estado. Conceptos, criterios.
- E. Selección de estados y transformación de estado (cambio de base), realizaciones, propiedades. **Formas o realizaciones canónicas**: diagonal, controlable, observable.
- F. **Controlabilidad y Observabilidad**. Conceptos, criterios: Gilbert, Kalman. Subsistemas Controlable y Observable.

### UNIDAD 3: CONTROL EN EL ESPACIO DE ESTADO DE SISTEMAS DINÁMICOS ELÉCTRICOS Y MECÁNICOS

**Objetivo:** Especificar, analizar y diseñar controladores lineales realimentados para sistemas eléctricos y mecánicos, desde el enfoque del espacio de estado.

- A. **Objetivos de Control y Especificaciones** de desempeño: estabilidad, seguimiento de consignas, rechazo de perturbaciones, robustez. Acciones básicas de control. Control en el Espacio de Estado.
- B. **Realimentación de Estado**. Conceptos básicos. Método de ubicación o asignación de polos de lazo cerrado; selección de polos: criterios y esfuerzo de control asociado. Mejoras: control integral, control por acción en avance (Feed-forward). Control 2 DoF.
- C. **Estimación de Estado**. Observadores asintóticos, de Estado completo vs. orden reducido. Conceptos. Diseño. Observadores aumentados. Compensación de Perturbaciones.
- D. **Diseño** de sistemas de control en el espacio de Estado. **Control óptimo cuadrático**. Control **digital**: conceptos de diseño continuo y emulación discreta vs. diseño digital directo. Implementación y simulación.
- E. **Aplicaciones** al control y regulación de subsistemas eléctricos y mecánicos en accionamientos.

### UNIDAD 4: CONTROL DE ACCIONAMIENTOS DE CORRIENTE CONTINUA (CC)

**Objetivo:** Estudiar los componentes, la dinámica y esquemas de control utilizados en accionamientos electromecánicos de CC, para distintas aplicaciones.

- A. **Máquinas** de corriente continua (con escobillas): excitación separada o con imanes permanentes (IP) vs. excitación serie o paralelo; principio de operación (conmutador mecánico). **Modelado** en régimen permanente estacionario y modelado dinámico en el espacio de estado; medición/estimación de parámetros.
- B. **Accionamientos de CC** de velocidad variable alimentado por rectificador controlado (CA/CC) o troceador (CC/CC), técnicas de conmutación por fase/PWM. Operación en 1, 2 vs. 4 cuadrantes (motorización y regeneración o frenado eléctrico, sentidos directo e inverso). Modelo “macroscópico” o promediado para control.
- C. **Control a lazo abierto**: por tensión de armadura y/o excitación, concepto. Modos de operación (torque constante, potencia constante/debilitamiento de flujo). Respuesta dinámica a lazo abierto, simulación y análisis.
- D. **Control a lazo cerrado o realimentado**: Control de movimiento (velocidad/posición), análisis y diseño. Control de corriente / torque. Simulación dinámica. Observadores de estado. Realimentación de estado. Estrategias de



Control. Control de movimientos: control en cascada vs. enfoque de estado. Evaluación de desempeño.

E. **Aplicaciones:** Ciclos de trabajo. Dimensionamiento y consideraciones de diseño.

### UNIDAD 5: CONTROL DE ACCIONAMIENTOS DE CORRIENTE ALTERNA (CA)

**Objetivo:** Estudiar los componentes, la dinámica y esquemas de control utilizados en accionamientos electromecánicos de CA trifásicos, sincrónicos y de inducción, para distintas aplicaciones.

A. **Máquinas** de corriente alterna (trifásicas): **sincrónicas** (IP/excitación separada o reluctancia sincrónica) vs. **asincrónicas** o de inducción, principios de operación (campo magnético rotante). **Modelado** en régimen permanente estacionario y modelado dinámico en el espacio de estado, medición/estimación de parámetros.

B. **Accionamientos de CA** de frecuencia/velocidad variable alimentado por inversor (CC/CA) con fuente de tensión constante, técnicas de conmutación PWM. Operación en 1, 2 vs 4 cuadrantes (motorización y regeneración o frenado eléctrico, sentidos directo e inverso). Modelo “macroscópico” o promediado para control.

C. **Control a lazo abierto.** Control de velocidad por frecuencia y tensión variable (Control escalar V/Hz), principio; resbalamiento constante, flujo constante. Respuesta dinámica a lazo abierto, simulación y análisis.

D. **Control a lazo cerrado o realimentado: Control** de Movimiento (velocidad/posición), análisis y diseño. **Control Vectorial** de corriente / torque con orientación de flujo, principios y comparación con CC. Método directo vs. Indirecto; estimación de flujo y resistencia rotórica (máquina de inducción). Modos de operación (torque constante, potencia constante/debililitamiento de flujo). Observadores de estado, prescindencia del sensor de velocidad (“sensorless” control). Control directo de Torque (DTC), principios, estrategias, comparación. Control de movimientos en cascada. Evaluación de desempeño.

E. **Aplicaciones:** Ciclos de trabajo. Dimensionamiento y consideraciones de diseño.

### METODOLOGÍA DE ENSEÑANZA

**Clases presenciales** teórico-prácticas (4 hs./semana) con la siguiente modalidad:

- Presentación y desarrollo de conceptos y teoría con uso de recursos informáticos, explicaciones en pizarrón y material bibliográfico, según convenga.
- Planteo de ejemplos y aplicación en accionamientos electromecánicos y subsistemas. Resolución de ejercicios simples con participación activa de los alumnos.
- Prácticas guiadas de modelado y simulación numérica (Matlab/Simulink) de sistemas eléctricos y mecánicos, simples y acoplados. Análisis de su comportamiento dinámico natural y controlado; diseño y sintonía de controladores, evaluación de desempeño.
- Prácticas de laboratorio, en función del equipamiento didáctico disponible.

**Atención de Consultas** (1h./semana) para aclarar dudas y reforzar temas de la asignatura.

**Tareas complementarias** obligatorias de los alumnos fuera del horario de clases:

- Estudio y ejercitación práctica, lectura de bibliografía y manuales actualizados.
- Proyecto Global Integrador: modelado, simulación y diseño de un sistema de control de accionamiento eléctrico en una aplicación mecatrónica especificada. Desarrollo. Presentación de Informe técnico y demostración mediante simulación. Coloquio y Exposición final.

**Material de apoyo y recursos didácticos:** proyector multimedia con pantalla, aula de prácticas con software de aplicación para simulación; laboratorio de automática y control de accionamientos.

Actividad	Carga horaria por semestre
Teoría y resolución de ejercicios simples	35
Formación práctica	
Formación Experimental – Laboratorio	10
Formación Experimental - Trabajo de campo	0
Resolución de problemas de ingeniería	10
Proyecto y diseño	5
<b>Total</b>	<b>60</b>



## BIBLIOGRAFÍA

### Bibliografía básica

Autor	Título	Editorial	Año	Ejemp. en biblioteca
Ogata, K.	<b>Ing. de Control Moderna</b> , 5° Ed.	Prentice-Hall	2010	2
Franklin, G, Powell, Emami-Naeini, A.	<b>Feedback Control of Dynamic Systems</b> , 7° Ed.	Pearson	2015	-
Krishnan, R.	<b>Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control</b>	Prentice-Hall	2001	-
Weidauer, J. and Messer R.	<b>Electrical Drives: Principles, Planning, Applications, Solutions.</b>	Publicis (Wiley VCH)	2014	-

### Bibliografía complementaria

Autor	Título	Editorial	Año	Ejemplares en biblioteca
Domínguez, S. et al.	<b>Control en el Espacio de Estado</b> , 2° Ed.	Prentice-Hall	2006	-
Krause, P. et al	<b>Analysis of Electric Machinery and Drive Systems</b> , 3° Ed.	Wiley-IEEE Press	2013	-
Melkebeek, Jan	<b>Electrical Machines &amp; Drives: Fundamentals &amp; Advanced Modeling</b>	Springer	2018	-
De Doncker, Rik; Pulle, Duco W.J.; Veltman, A. (Ed.)	<b>Advanced Electrical Drives: Analysis, Modeling, Control.</b>	Springer	2011	-
Siemens, ABB, SEW, Schneider Electric, etc.	Manuales y catálogos técnicos de Máquinas Eléctricas y Accionamientos Industriales Comerciales.			
Varios	Artículos técnicos seleccionados de publicaciones especializadas.	IEEE, etc.		

### PROCESO DE EVALUACIÓN Y CONDICIONES DE APROBACIÓN (s/ Ord. CS 108/10)

La aprobación de la asignatura se obtiene cumpliendo un proceso de **evaluación continua** que consta de los siguientes pasos y requisitos progresivos:

1. **Inscripción** formal en condición de **alumno regular**, teniendo cumplido el régimen de correlatividades anteriores estipulado para esta Asignatura según Resol. CD N° 029/16.
2. **Asistencia** participativa a clases presenciales teórico-prácticas (75% mínimo obligatorio), en las fechas estipuladas en el documento anexo P2 – Planificación de Cátedra 2019 (según Calendario Académico 2019). Inasistencias deberán justificarse.
3. Aprobación de **2 Evaluaciones Parciales** escritas teórico-prácticas (con Calificación mínima 60% = 6 puntos). Cada evaluación parcial tendrá, en caso de no aprobación, una instancia de Recuperación en fecha a definir por la cátedra.
4. El cumplimiento de los tres pasos anteriores en término permite acreditar la **Regularización de cursado** de la asignatura al final del cursado y habilita a avanzar con el desarrollo del Proyecto Global Integrador asignado.
5. Desarrollo y seguimiento de avance del Proyecto Global Integrador, en los meses inmediatos posteriores a la regularización de cursado.
6. Presentación y Aprobación del Informe de **Proyecto Global Integrador**, y posterior Demostración del Proyecto y Coloquio (Calificación mínima 60% = 6 puntos).
7. Inscripción en Mesa de Examen normal o especial, con Presentación del Proyecto Global Integrador, a efectos de **Acreditación de Aprobación** de la Asignatura. Calificación final = 0.50 x Calificación Proyecto Global Integrador + 0.25 x Calificación Evaluación Parcial 1 + 0.25 x Calificación Evaluación Parcial 2.

**Nota:** Esta es una asignatura técnica multidisciplinaria con contenido teórico-práctico, que requiere interacción participativa en clase, estudio y desarrollo de aplicaciones prácticas para adquirir los conocimientos y competencias necesarias, con seguimiento y evaluación continua del proceso de aprendizaje. Para inscribirse en Mesa de Examen es requisito indispensable haber realizado el cursado completo y regularización de la misma en tiempo y forma, como así también la realización del Proyecto Global Integrador indicado. NO se admiten alumnos en condición de libre que no hayan cumplido estos requisitos.

Mendoza, 5 de julio de 2019. Ing. Gabriel L. Julián, Prof. Titular