

| <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: 2022</b>   | <b>Semestre: 8°</b>                     | <b>Horas Semestre: 60</b> | <b>Horas Semana: 4</b> |

### **CONTENIDOS MÍNIMOS (Ord 33/2009-CD)**

Representación de sistemas mediante Variables de Estado. Forma general para sistemas de Tiempo Continuo (TC) y Discreto (TD). Descripción de sistemas lineales invariantes TC y TD. Respuesta natural y forzada, velocidad, resonancia. Efectos de retardos en sistemas TC y TD, y del cambio del período de muestreo en sistemas TD. Obtención de la función de transferencia a partir de la representación en variables de estado. Formas Canónicas. Estabilidad, controlabilidad, observabilidad. Observadores. Modelos para sistemas interconectados en serie, paralelo y realimentados. Realimentación de Estado. Regulador óptimo. Aplicación: Análisis y simulación de sistemas electrónicos de control de la velocidad de motores de CC y CA.

### **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 y no 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.

- A. **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.).
- B. **Fundamentos** y revisión de conceptos básicos. **Accionamientos eléctricos:** tipos de cargas mecánicas; máquinas eléctricas y convertidores electrónicos de potencia: tipos, principios, dispositivos. **Control Automático:** 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** de CC y CA (velocidad, posición, torque, potencia).
- C. 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 o no lineales de distintos sistemas físicos eléctricos y mecánicos, y analizar su comportamiento y propiedades, desde el enfoque del espacio de estado.

- A. **Sistemas dinámicos** físicos: concepto de estado interno, orden del sistema; entradas (manipuladas y de perturbación), salidas: sistemas SISO vs. MIMO o multivariables (MV). Modelado y representación mediante **Variables de Estado:** ecuación de estado; diagrama de bloques de estado. Espacio de estado, trayectorias. Modelos Lineales vs. No Lineales. Linealización Jacobiana en Puntos de Operación. Espacio de Operación. Modelos lineales con parámetros variables (LPV). Linealización por Retroalimentación No Lineal.
- B. **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 retroalimentados. Modelos de 1°, 2°, 3° orden, orden superior: ejemplos y **aplicaciones** a subsistemas eléctricos y mecánicos en accionamientos.
- C. Modelos LTI en Tiempo Continuo vs. Tiempo Discreto. Efectos de retardos. **Discretización** de modelos 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 retroalimentados 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. **Retroalimentación 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 (Feedforward). 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 (chopper 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 o campo magnético, reforzamiento). Respuesta dinámica a lazo abierto, simulación y análisis.
- D. **Control a lazo cerrado o retroalimentado:** Control de movimiento (velocidad/posición), análisis y diseño. Control de corriente / torque. Simulación dinámica. Observadores de estado. Retroalimentación 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): **síncronas** (IP/excitación separada o reluctancia síncrona) vs. **asíncronas** 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. Coordenadas qd0.
- 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 retroalimentado**: 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/debilitamiento 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 h/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** (1 h/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           | Ejemplares en biblioteca |
|---------------------------------------|--|----------------------|---------------|--------------------------|
| Ogata, K.                             | <b>Ingeniería 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./ 8° Ed.              | Pearson              | 2015/<br>2019 | -                        |
| 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, Andre (Eds.) | <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 2022 (según Calendario Académico 2022). 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 en 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, según Guía de Trabajo actualizada.
6. Presentación y Aprobación del **Informe Técnico** del 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 =  $0.50 \times \text{Calificación Proyecto Global Integrador} + 0.25 \times \text{Calificación Evaluación Parcial 1} + 0.25 \times \text{Calificación Evaluación Parcial 2}$ .

**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, con presentación y aprobación del Informe Técnico y Coloquio. NO se admite en Mesa de Examen a alumnos en condición de libre que no hayan cumplido todos estos requisitos.

**Mendoza, 1 de agosto de 2022.**

**Ing. Gabriel L. Julián, Prof. Titular**