

## 1.- Análisis de la asignatura

### 1.1- Encuadre académico y conceptual de la asignatura

Control Automático es una asignatura regular anual del cuarto nivel de la carrera de Ingeniería Eléctrica, que se incluye en la oferta de asignaturas de la carrera con el objeto de formar al egresado en aptitudes necesarias para su desenvolvimiento en el ámbito de la industria local, regional, nacional así como en el exterior.

A través del uso de una técnica devenida de la Física clásica, se propone el desarrollo de los saberes en este espacio mediante tres herramientas: modelos matemáticos basados en ecuaciones diferenciales, contraste de modelos con modernos toolboxes de Matlab/Simulink y finalmente una correcta medición y análisis con kits demostradores reales.

Para evidenciar la necesidad de desarrollo de herramientas, ideas y principalmente, el estrecho contacto entre los sistemas de control y las diferentes áreas de la ingeniería, se presentan tres proyectos/kits reales que resumen y exponen modelos clásicos de control:

- Control de un motor DC con un disco mecánico acoplado (carga mecánica) usando un amplificador de potencia restador.
- Sistemas Ball-Beam, en el que se posee medición de posición de la bola y conexión a USB mediante ARDUINO
- Sistema péndulo invertido, que posee medición angular, control PWM y conexión a USB con ARDUINO.

Estos sistemas no sólo representan modelos a escala de problemas reales, sino que también modelan y contemplan diversos sistemas que existen y pueden ser estudiados:

- Control de puentes grúa
- Control de máquinas eléctricas
- Control de vehículos y cargas mecánicas
- Sistemas de guiado de cohete y propulsores de satélites

Su amplio temario, se presenta en los siguientes ejes temáticos:

- Introducción a la teoría e historia de los sistemas de control
- Modelos dinámicos de sistemas físicos
- Análisis de sistemas de segundo orden y sus parámetros clásicos: amortiguación, máximo exceso pico, tiempo de crecimiento y establecimiento
- Ventajas de la realimentación negativa, robustez y rechazo de perturbaciones



- Diagramas de bloques
- Respuestas de sistemas lineales invariantes en el tiempo ante entradas tipificadas
- Diseño de controladores PID para sistemas de segundo orden y con retardos
- Polos y ceros adicionales
- Método de Estabilidad de Routh
- Método del lugar de raíces, reglas de construcción y aplicación
- Método de Respuesta en Frecuencia, Bode. Reglas de construcción asintóticas
- Márgenes de Fase y Ganancia
- Método de estabilidad de Nyquist
- Introducción a los sistemas de control en variables de estado
- Solución de ecuaciones diferenciales ordinarias lineales invariantes en tiempo, solución completa de control
- Diseño de controladores en variables de estado. Regulador lineal cuadrático

Se trabajará sobre los principios, métodos y resultados básicos de los problemas, dando una clara percepción de cuál es el campo de acción de la matemática en la ingeniería, a saber:

- Modelado: traducir la información y los datos físicos o de otras áreas en forma de sistemas dinámicos modelados como ecuaciones diferenciales en variables de estado.
- Análisis de modelos/Simulación: mediante la aplicación de transformada de Laplace para aquellos modelos que resulten lineales o linealización en caso contrario, se estudiarán las propiedades y posibilidades de aplicación de cada modelo. Se hará uso de las diferentes herramientas informáticas: Matlab/Simulink, Wolframalpha, Tracker, Phet así como ARDUINO-.
- Interpretación: entendiendo el significado e implicancias de la solución matemática del problema en términos de la ingeniería, se podrá interpretar las mediciones y contraste con los modelos y simulaciones.

## 1.2- Objetivos de la materia

### Objetivo general

- Otorgar herramientas de modelado, estudio y diseño de controladores para los sistemas dinámicos presente en las actividades de la ingeniería.

El estudiante deberá ser capaz de determinar la respuesta en régimen permanente y transitorio de sistemas realimentados frente a entradas de referencia y perturbación o carga y diseñar los compensadores necesarios para su estabilización, aplicando la teoría del control clásico. Además, deberá determinar la observabilidad y controlabilidad de sistemas físicos.



### Objetivos específicos

- Modelar un sistema dinámico, clasificarlo y presentarlo en variables de estado para su posterior estudio y diseño de controladores (estabilidad).
- Estudio de sistemas Lineales e Invariantes en Tiempo (LTI) comprendiendo que dichos sistemas conforman sólo un porcentaje de los posibles modelos que pueden encontrarse en la realidad de la ingeniería.
- Construir funciones de transferencia para luego crear diagramas de bloques de clarifiquen las diferentes variables del sistema: Entrada de referencia, Entrada de control (variable manipulada), Salida.
- Utilizar las diferentes metodologías para estudio de estabilidad: Routh, Bode, Nyquist y Lugar de Raíces
- Aplicar y diseñar correctamente un controlador/compensador para cumplir con requerimientos especificados a lazo cerrado
- Simular y contrastar adecuadamente los modelos teóricos utilizando Matlab/Simulink así como software simbólico como.

### **1.3- Contenidos mínimos, Ordenanza 1026**

Los contenidos de la asignatura se dividen en 8 unidades temáticas:

Unidad 1: Función de transferencia. Grafos de señal. Diagramas en bloque.

Eje temático: estudio y aplicaciones de modelos de sistemas LTI usando transformada de Laplace

1. Modelos de sistemas físicos: eléctricos, mecánicos, termodinámicos e hidráulicos.
2. Sistemas LTI: Transformada de Laplace
3. Linealización
4. Sistemas de segundo orden en forma universal
5. Funciones de transferencia SISO

Unidad 2: Realimentación.

Eje temático: estudio de diagramas de bloques en sistemas con realimentación con entradas tipificadas

1. Diagrama de bloques usando funciones de transferencia
2. Análisis de funciones de transferencia de lazo cerrado
3. Diagramas de bloque: Algebra de bloques y regla de Masson (grafos)



Unidad 3: Régimen permanente. Entrada de referencia y perturbación o carga.

Eje temático: análisis de sistemas LTI usando entradas tipificadas

1. Estudio de respuestas de lazo cerrado usando entradas tipificadas
2. Rechazo de perturbaciones y seguimiento

Unidad 4: Estabilidad. Criterios y su aplicación. Respuesta frecuencia Representación de Bode.

Eje temático: Concepto de estabilidad de sistemas de control y su determinación.

1. Definición de estabilidad y estabilidad BIBO
2. Teoremas de estabilidad
3. Método de Bode: Respuesta en frecuencia
4. Método de Nyquist

Unidad 5: Compensación en cascada y por realimentación.

Eje temático: diseño de compensadores en lazo cerrado

1. Diseño de compensadores por el método de Bode
2. Compensador Lead
3. Compensador Lag
4. Compensador Lead/Lag
5. Ejemplos de diseño de compensadores y contraste con controlador PID

Unidad 6: Representación de sistemas físicos mediante variables de estado. Matriz de estado. Ecuación retransición. Función retrasferencia y autovalores.

Eje temático: estudio de sistemas LTI utilizando variables de estado

1. Representación matricial de sistemas LTI en variables de estado
2. Solución completa de un sistema LTI de control
3. Representación matricial de sistemas LTI
4. Autovalores y su equivalencia con polos de funciones transferencia

Unidad 7: Observabilidad y controlabilidad de sistemas

Eje temático: definición y aplicación de los conceptos de observabilidad y controlabilidad

1. Definición de observabilidad
2. Test de observabilidad de Kalman
3. Definición de controlabilidad
4. Test de controlabilidad de Kalman



## Unidad 8: Criterio de optimización de sistemas de control

Eje temático: optimización mediante minimización de funcionales cuadráticos de sistemas LTI

1. Definición de un funcional de minimización
2. Minimización de un funcional cuadrático sujeto a un sistema LTI
3. Regulador LQR
4. Regulador/Observador LQG

### **1.4- Relación de la asignatura con el Perfil de Egreso y las Actividades Reservadas al título de Ing. Mecánico**

En un todo de acuerdo con la Ordenanza 1026, el espacio curricular otorga herramientas para *“contar con ingenieros hábiles para operar tecnologías existentes, adaptadas a las necesidades locales y desarrollar procesos aptos para permitir la competencia internacional, realizar investigación y desarrollo, creando nuevas tecnologías y que a través de la formación de posgrado actualicen y refuercen sus conocimientos.”*

Por otra parte, y tomando como base la Resolución 1254/2018, la asignatura da herramientas elementales para la actividad reservada del Ingeniero Electricista *“Diseñar, calcular y proyectar sistemas de generación, transmisión, conversión, distribución y utilización de energía eléctrica; sistemas de control y automatización y sistemas de protección eléctrica. Proyectar, dirigir y controlar la construcción, operación y mantenimiento de lo anteriormente mencionado. Certificar el funcionamiento, condición de uso o estado de lo mencionado anteriormente. Proyectar y dirigir lo referido a la higiene y seguridad en su actividad profesional.”*

### **1.5- Relación y tributación de la asignatura a las Competencias Genéricas (CG)**

Se detallan a continuación las competencias genéricas de egreso a las que la asignatura tributa, en un todo de acuerdo con su plan de estudios y a las Actividades Reservadas del título de Ing. Electricista, Resolución ME 1254/2018.

En un todo de acuerdo con el Análisis de la asignatura, la cátedra desarrolla saberes para que tributen de manera directa a las siguientes competencias genéricas (CG):

#### **CG 1: Identificar, formular y resolver problemas de ingeniería**

- Utilizando las técnicas de formulación y modelado de sistemas reales en variables de estado con ecuaciones.



**CG 2: *Concebir, diseñar y desarrollar proyectos de ingeniería***

- Capacidad para diseñar y desarrollar proyectos de ingeniería: mediante la modelización matemática de los fenómenos físicos que se estudian.

**CG 3: *Gestionar, planificar, ejecutar y controlar proyectos de ingeniería***

- Capacidad para planificar y observar el correcto desarrollo de proyectos de sistemas de control a baja, mediana y gran escala (potencia) utilizando las herramientas predictivas basadas en modelos y funciones de transferencia.

**CG 4: *Utilizar de manera efectiva las técnicas y herramientas de aplicación en la ingeniería***

- Mediante la asociación de problemas reales a modelos simplificados y sus posteriores soluciones de control: controladores PDI, compensadores y.
- A través del uso de software específico que permita ahorrar tiempo a la vez que se proveen datos de verificación y contraste: Matlab/Simulink, WolframAlpha (Mathematica) y/o Maple, ARDUINO-IDE (C++).

**CG 5: *Contribuir a la generación de desarrollos tecnológicos y/o innovaciones tecnológicas.***

- Mediante la aplicación de las herramientas de la asignatura, se crean soluciones que deben ser implementadas de hardware real.

**CG 6: *Desempeñarse de manera efectiva en equipos de trabajo***

- Mediante la entrega de trabajos integradores obligatorios solicitados por la cátedra, bajo la consigna de conformar grupos de dos/tres estudiantes, entregando un informe redactado bajo el formato (plantilla) aportado por la cátedra y aportando una defensa oral.

**CG 7: *Comunicarse con efectividad***

- Capacidad para producir e interpretar textos técnicos (memorias, informes, etc.) y presentaciones públicas: mediante la presentación de trabajos integradores aplicados a kits como modelos simplificados de sistemas reales, utilizando software específico y su respectivo informe.

**CG 8: *Actuar con ética, responsabilidad profesional y compromiso social, considerando el impacto económico, social y ambiental de su actividad en el contexto local y global.***

- Analizando las consecuencias ambientales, sociales y económicas de las diferentes soluciones de control consideradas con las metodologías aportadas por la asignatura.



**CG 9: Aprender en forma continua y autónoma.**

- Capacidad para lograr autonomía en el aprendizaje: a través de la búsqueda de bibliografía y material para el estudio, realizando ensayos y mediciones con equipos reales aportados por la por unidad temática.

**CG 10: Actuar con espíritu emprendedor**

- A partir de las soluciones que deben encontrarse a los diferentes problemas propuestas por el espacio curricular, generando la necesidad de emprender nuevas soluciones innovadoras

**1.6- Relación y tributación de la asignatura a las Competencias Específicas de Egreso (CEE).**

La planificación y metodología propuesta para la materia permiten que los saberes del espacio curricular sirvan de medio, fundamento o relación próxima a las competencias específicas de egreso 1.1, 1.2, 2.2 y 2.3, en un todo de acuerdo con su plan de estudios y a las Actividades Reservadas del título de Ing. Electricista, Resolución ME 1254/2018.

**CEE 1.1: Desarrollar y aplicar metodologías de proyecto, cálculo, diseño y planificación de sistemas, e instalaciones de generación, conversión, transmisión, distribución, supervisión, automatización, control, medición y utilización de energía eléctrica**

- Se tributa desde la fundamentación en la formulación matemática de fenómenos físicos que se necesiten para diseñar y/o desarrollar proyectos de sistemas de control y automatización.

**CEE 1.2: Desarrollar, seleccionar y especificar, equipamientos, aparatos y componentes de los sistemas descriptos.**

- Se tributa desde el cálculo y la modelación posterior para su implementación tecnológica.

**CEE 2.2: Investigar sobre el desarrollo y aplicación de tecnologías emergentes relacionadas con la energía eléctrica**

- Se tributa desde la necesidad de obtener actualizaciones continuas de equipos y hardware que permita una mejor y más rápida implementación de las soluciones de control.

No se tributa al resto de las competencias específicas de egreso detalladas en la Resolución ME 1254/2018.



## 1.7- Meta general de la asignatura, Objetos de Conocimiento y Resultados de Aprendizaje

### Meta General de la asignatura

“El alumno deberá ser capaz de determinar la respuesta en régimen permanente y transitorio de sistemas realimentados frente a entradas de referencia y perturbación o carga y diseñar los compensadores necesarios para su estabilización, aplicando la teoría del control clásico. Además, deberá determinar la observabilidad y controlabilidad de sistemas físicos.”

### Objetos de Conocimiento de la asignatura y Resultados de Aprendizaje

#### MODELADO EN VARIABLES DE ESTADO

- Resultado de aprendizaje

*Aplica las herramientas y técnicas de modelado para los diferentes sistemas físico, determinando un conjunto de ecuaciones diferenciales que escribe en forma vectorial (variables de estado) para su posterior análisis y control, reconociendo su utilidad en el campo aplicación de la ingeniería.*

#### TRANSFORMADA DE LAPLACE: FUNCIONES DE TRANSFERENCIA

- Resultado de aprendizaje

*Utiliza la Transformada de Laplace para transformar un modelo en variables de estado lineal (LTI), reconociendo su importancia como herramienta práctica para la resolución y estudio de sistemas lineales de control y diseño de controladores/compensadores.*

#### ESTABILIDAD DE SISTEMAS LTI

- Resultado de aprendizaje

*Utiliza los teoremas de Routh-Hurwitz, así como los métodos de Bode, Nyquist y lugar de raíces para determinar si un sistema estable/inestable y sus posibilidades de control y estabilización posteriores.*

#### DISEÑO DE CONTROLADORES-COMPENSADORES

- Resultado de aprendizaje

*Modela sistemas reales mediante el uso de kits de laboratorio (sistemas simplificados) , calculando y diseñando un controlador-compensador adecuado para cada conjunto de requerimientos transitorios y estacionarios (rechazo de perturbaciones y seguimiento).*

#### USO DE SOFTWARE ESPECIFICO

- Resultado de aprendizaje



*Utiliza softwares profesionales como Matlab/Simulink para determinar la robustez de los diseños obtenidos, así como su viabilidad e implementación posterior en C++ vía plataformas ARDUINO.*

### Mediación Pedagógica

#### **1.8- Metodología de trabajo**

*Exposición oral de la teoría con ayudas didácticas visuales y experimentos prácticos, para la presentación de conceptos.*

*Mediciones y ensayos sobre equipos didácticos.*

*Análisis de los resultados como una forma de afianzar los conceptos.*

Para todas los Objetos de Conocimiento la mediación pedagógica será a) entrega de trabajos integradores para cada modelo/ensayo/mediciones realizadas a resolver con Matlab/Simulink o utilizando el software online WolframAlpha, b) realización de mediciones en tiempo real usando osciloscopio para su análisis en y exportación de datos a Matlab y c) defensa oral de trabajos de integración con presentación de informes.

#### **1.9- Metodología de dictado**

La asignatura se orienta al manejo de ecuaciones diferenciales LTI, así como un uso intensivo de la transformada de Laplace para la determinación de funciones de transferencia equivalentes.

Por otro lado, se promueve el contraste continuo entre teoría (modelos y herramientas matemáticas) con aplicaciones prácticas: mediciones y simulaciones, incentivando a las y los estudiantes a que adquieran habilidades para la manipulación de herramientas de cálculo avanzado e identifiquen el problema a tratar, su desarrollo teórico, su aplicación práctica y su posterior resolución computacional.

También se enfocarán los contenidos en las metodologías de aprendizaje centrado en el estudiante (ACE), en la formación por competencias (FxC) y en el uso intensivo del aprendizaje activo (AA).

En virtud de ello, la metodología de dictado consistirá en:

- Desarrollo de clases teórico – prácticas mediante exposición presencial ó virtual con el uso intensivo de AA.
- Aprendizaje basado en problemas.
- Mediciones y conclusiones, exportando datos de estudio a Matlab/Simulink.
- Resolución de casos prácticos reales: kits demostrativos y ejemplos.



Se proveerá a las y los estudiantes de guías de Trabajos Prácticos específicos para su resolución grupal y exposición, y también se promoverá el uso de software de ingeniería con procesadores de cálculo simbólico Matlab/Simulink, WolframAlpha o Maple que ayudará en la resolución de los problemas a abordar en la asignatura.

En lo que respecta a la enseñanza de saberes, se presenta el desagregado en *saberes conocer, saberes hacer y saberes ser*.

Saberes conocer: *Modelado de sistemas dinámicos y sistemas de control, teoremas de estabilidad: Routh-Hurwitz, Bode y Nyquist así como el método aproximado de lugar de raíces.*

Saberes hacer: *Planteo de modelos físicos en variables de estado, obtención de funciones de transferencia para su estudio de estabilidad y diseño de controladores.*

Saberes ser: *Respeto por la igualdad de género, participación en foros temáticos, cumplimiento de fechas de entrega de prácticos. Utilización del modelo de plantilla para la entrega de trabajos prácticos integradores.*

#### **1.10- Condiciones para la aprobación de la asignatura**

La evaluación será del tipo integradora y se desagrega en 2 condiciones:

- Condiciones para la aprobación directa: será condición para la aprobación directa

- a) Entrega en tiempo y forma de los trabajos prácticos solicitados
- b) Correcta exposición y defensa de los informes entregados.

Quienes aprueben las instancias a) y b), estarán en condiciones de aprobación directa. Cada trabajo práctico integrador referente a cada modelo abordado, tendrá una instancia de recuperación luego de la fecha de entrega excedida. Los estudiantes que no aprueben la instancia de recuperación de algún trabajo integrador perderán el cursado de la materia.

- Condiciones para la aprobación indirecta: los estudiantes que aprueben la entrega de trabajos prácticos, pero con una nota inferior a 6 aunque superior a 4, tendrán derecho a la aprobación indirecta de la materia en un todo de acuerdo con lo estipulado en la Ordenanza 1549.

Los estudiantes que no alcancen los objetivos de aprobación directa ó indirecta, deberán recursar la materia.

#### **1.11- Integración y articulación de la asignatura con el área, el nivel y el diseño curricular**

De niveles anteriores, la asignatura necesita que las y los estudiantes ingresen a Control Automático con las competencias de las asignaturas Análisis Matemático I y II, Fundamentos para el análisis de Señales y Álgebra y Geometría Analítica, Fundamentos de



Informática, Física I y II, Termodinámica, Cálculo Numérico, Termodinámica, Máquinas Eléctricas I, electrotecnia I y II.

En ese sentido deberán tener competencias sobre los temas Transformada de Laplace, funciones de transferencia, modelos físicos de sistemas, respuestas transitorias de sistemas eléctricos y modelos de máquinas eléctricas, así como vectores, matrices y las herramientas derivadas del análisis matemático.

En el mismo nivel se promoverá la articulación con Máquinas Eléctricas I (modelos de máquinas eléctricas en variables de estados), con Electrónica I (método de Bode aplicado a operacionales).

Hacia arriba articulará con asignaturas del tronco integrador, Análisis Matemático I y II, Fundamentos para el análisis de Señales y Álgebra y Geometría Analítica (modelos en variables de estado vectorial), Fundamentos de Informática (implementación en ARDUINO IDE y Matlab), Física I y II, Termodinámica, , Termodinámica, Máquinas Eléctricas I, electrotecnia I y II (modelado de sistemas físicos), Cálculo Numérico (métodos numéricos de resolución de ecuaciones diferenciales aplicado a modelos LTI.

## **2.- Programa analítico**

El programa analítico de la materia se entrega en documento aparte del presente.

## **3.- Evaluación diagnóstica**

El formulario de evaluación diagnóstica se entrega en documento aparte del presente, junto con el análisis de los resultados.

## **4.- Planificación de la asignatura**

4.1- Modalidad de dictado: anual

Horas semanales: 5/semana

4.2.- Calendario Cálculo Avanzado 2021

El cronograma (calendario) se entrega en documento aparte del presente.

