



*Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional Buenos Aires*

CARRERA: Ing. Electrónica

PROGRAMA ANALÍTICO DE ASIGNATURA

NOMBRE DE LA ACTIVIDAD CURRICULAR: SISTEMAS DE CONTROL

Año Académico: 2023

Área: Sistemas de Control

Bloque: Tecnologías Aplicadas

Nivel: 5°

Tipo: Obligatoria

Modalidad: Anual

CARGAS HORARIAS TOTALES:

<i>Horas reloj</i>	<i>Horas cátedra</i>	<i>Horas cátedras semanales</i>
96	128	4

COMPOSICIÓN DEL EQUIPO DE CÁTEDRA:

Profesor Titular: Dr. Ing. Franco Martin Pessana (Director de Cátedra)

Profesor Asociado: Ing. Juan Collazo

Profesor Adjunto: Ing. Pablo Cerallo

ATP 1°: Ing. Damián Granzella

Ing. Nicolás Ríos Taurasi

Ing. Juan Tantera

FUNDAMENTACIÓN

Sistemas de Control es una asignatura del 5° nivel de la carrera de Ingeniería Electrónica. Forma parte curricular de la carrera en el Área de Sistemas de Control. Componen el Área de Sistemas de Control:

- Máquinas Eléctricas.
- Electrónica de Potencia.
- Sistemas de Control.

Los sistemas de control se encuentran a nuestro alrededor en todas nuestras actividades diarias, ya sea directa o indirectamente. Desde un control de temperatura en un aire acondicionado, un control de velocidad crucero en un automóvil, hasta el montaje de toda una



línea de circuitos integrados, automóviles, televisores 8K y monitoreo en salas de terapia intensiva entre otros.

Estos sistemas de control pueden diseñarse en el dominio del tiempo continuo (controladores PID, redes de adelanto–retraso, realimentación del vector de estado, observadores con estimación completa del vector de estado, etc.), o bien, puede realizarse la tarea del controlador de manera digital, considerando para ello una versión muestreada de la planta a controlar, entradas y salidas digitales, controladores y/o compensadores digitales, etc.

Esta asignatura, además de los objetivos y logros a ser alcanzados por parte del alumno, se enmarca en el perfil del Ingeniero Tecnológico, y, en forma más específica dentro del perfil del Ingeniero Electrónico.

La orientación al análisis, modelización, simulación, diseño y evaluación de Sistemas de Control, apoyado en las herramientas temporales y frecuenciales de análisis y diseño, busca afianzar en el alumno de Sistemas de Control, su interés por la investigación y el desarrollo, además de la utilización de sólidos conocimientos adquiridos para el abordaje de cualquier control analógico y/o digital, en su vida como profesional de la Ingeniería.

El abordaje integrador del control analógico moderno junto con el control digital, abre un nuevo panorama en el proceso de enseñanza–aprendizaje:

- ✓ Generación de trabajos prácticos integradores de simulación y de laboratorio para los alumnos.
- ✓ Nuevos desafíos en proyectos de I&D+i, colaborando mutuamente en docencia e investigación con distintos Laboratorios de la carrera y las asignaturas del Área, juntamente con asignaturas de articulación horizontal y vertical a Sistemas de Control.
- ✓ Concepción, análisis y desarrollo de proyectos finales basados en enfoques innovadores de la enseñanza del *Control Moderno y Digital*.
- ✓ Formación de los alumnos para instancias superiores de desarrollo, investigación y educación de posgrado.

La formación de *Recursos Humanos en Docencia e Investigación* es uno de los pilares en continua consolidación de nuestra Facultad Regional. Es en este punto donde *Sistemas de Control* y las asignaturas del área, aúnan esfuerzos para formar el semillero de futuros auxiliares y profesores del Área de Sistemas de Control, así también como la generación de proyectos de investigación y desarrollo que puedan llevar a especializaciones y/o una Maestría del Área.

COMPETENCIAS DE EGRESO ESPECÍFICAS A LAS QUE CONTRIBUYE

Competencia	Competencias de Actividades reservadas	Competencias de Alcances
-------------	--	--------------------------



	Baja	Media	Alta	
CE 1.1: Diseñar, proyectar y calcular sistemas, equipos y dispositivos de generación, transmisión y/o procesamiento de campos y señales analógicos y digitales; circuitos integrados; hardware de sistemas de cómputo de propósito general y/o específico y el software a él asociado; hardware y software de sistemas embebidos y dispositivos lógicos programables; sistemas de automatización y control; sistemas de procesamiento y de comunicación de datos y sistemas irradiantes, para brindar soluciones óptimas de acuerdo a las condiciones técnicas, legales, económicas, humanas y ambientales.			X	
CE 1.3: Plantear, interpretar, modelar, analizar y resolver problemas de diseño e implementación de circuitos y sistemas electrónicos		X		
CE 1.6: Diseñar, proyectar y calcular circuitos y sistemas de control			X	
CE 2.1: Proyectar, dirigir y controlar la construcción, implementación, mantenimiento y operación de lo mencionado en CE 1.7 *.		X		

* CE 1.7. Diseñar, proyectar y calcular circuitos y sistemas electrónicos aplicados a la generación, manejo, amplificación, procesamiento, instrumentación y acondicionamiento de energía eléctrica y señales de distinta naturaleza.

COMPETENCIAS DE EGRESO GENÉRICAS A LAS QUE CONTRIBUYE:

Competencia	Baja	Media	Alta
Identificar, Formular y resolver problemas de Ingeniería Electrónica			X
Concebir, diseñar y desarrollar proyectos de Ingeniería Electrónica		X	
Utilizar de manera efectiva las técnicas y herramientas de aplicación de la ingeniería Electrónica.			X
Desempeñarse de manera efectiva en equipos de trabajo.		X	
Comunicarse con efectividad.		X	



OBJETIVOS (APRENDIZAJES/LOGROS A ALCANZAR)

- ✓ Plantear y simular modelos matemáticos de sistemas dinámicos, lineales e invariantes en el tiempo (LTI).
- ✓ Analizar la respuesta temporal y frecuencial de los sistemas LTI, de una entrada y una salida (SISO).
- ✓ Analizar la estabilidad de entrada-salida de sistemas LTI.
- ✓ Implementar y ajustar controladores PID en sistemas de automatización y control.
- ✓ Simular e implementar controladores digitales.
- ✓ Linealizar un modelo físico para aplicar técnicas temporales y frecuenciales complejas.
- ✓ Adquirir conocimiento y habilidades para obtener modelos matemáticos de plantas y procesos de distintos dominios físicos (expresados como función transferencia y espacio de estados).
- ✓ Describir un sistema físico como un diagrama en bloques (o flujo), para poder controlarlo mediante diversas técnicas de compensación/control.
- ✓ Analizar el comportamiento dinámico del sistema de control para establecer criterios de estabilidad temporal sobre el mismo.
- ✓ Analizar el comportamiento frecuencial de los sistemas dinámicos (Bode, Nyquist), para observar su estabilidad en frecuencia.
- ✓ Adquirir habilidades en diseño de controladores lineales (P, PI, PD, PID y redes compensadoras), para el diseño de sistemas controlados.
- ✓ Adquirir habilidades en el diseño de controladores lineales, para emplear modelos de estados, su observación y realimentación.
- ✓ Analizar sistemas de control a lazo cerrado en el dominio digital para el diseño de controladores digitales y redes compensadoras digitales.
- ✓ Diseñar controladores digitales por realimentación el vector de estado discreto para poder concluir los mismos en observadores digitales de orden completo.
- ✓ Evaluar técnicas de control óptimo para el diseño de controladores óptimos cuadráticos en estado transitorio y estacionario.

CONTENIDOS

Contenidos mínimos

- Introducción a los sistemas de automatización y control.



- Modelización matemática de sistemas dinámicos y simulación. Modelos en el Espacio de Estados y Función Transferencia.
- Análisis de la respuesta transitoria.
- Análisis del estado permanente. Clasificación de sistemas de control.
- Estabilidad de sistemas de control.
- Método del lugar de las raíces.
- Método de Respuesta en Frecuencia.
- Proyecto, diseño y cálculo de sistemas de control en tiempo continuo y discreto.

Contenidos analíticos

Unidad Temática 1. Introducción a los sistemas de control

Transformada de Laplace. Ecuaciones diferenciales. Sistemas LTI. Solución transitoria y permanente. Representaciones gráficas. Diagramas y álgebra de bloques. Diagramas de flujo de señal. Diagramas de simulación analógicos. Regla de Mason. Lazo abierto y lazo cerrado. Función Transferencia (FT). Variables de Estado (VE). Sistemas SISO y MIMO. Linealización de sistemas no lineales. Obtención de la FT conocido el Modelo de Estado. Obtención del Modelo de Estado conocida la FT. Metodología de trabajo en la ingeniería de control.

Unidad Temática 2. Modelado de sistemas físicos

Modelos matemáticos y sus aproximaciones. Modelos basados en FT (SISO) y en VE (MIMO). Matriz de Transferencia. Representación gráfica de sistemas sobre la base de las VE (diagrama de simulación analógica). Obtención del modelo basado en la FT y VE para sistemas mecánicos, hidráulicos, térmicos, eléctricos, de nivel, electrónicos y combinados. Resolución de modelos LTI, dados por su FT o por las VE, mediante la simulación empleando Matlab y Simulink.

Unidad Temática 3. Análisis de la respuesta transitoria y permanente

Procesos con una, dos y tres constantes de tiempo. Raíces complejas de segundo orden. Polos y ceros. Sistemas con tiempo muerto. Respuesta temporal a señales de entrada: impulso de Dirac, escalón, rampa y parábola. Respuesta transitoria. Solución mediante Transformada de Laplace de la Función Transferencia y Variables de Estado. Especificación de la respuesta transitoria sobre la base de la respuesta al escalón. Ejemplos de aplicación.

Respuesta en estado estacionario (permanente), a entradas aplicadas en la referencia, perturbación y ruido de la medición. Error en estado estacionario. Caso de sistemas con realimentación unitaria y no unitaria. Error Verdadero y Error Actuante. Tipos de Sistemas. Constantes y Coeficientes de error. Exactitud de los sistemas de control. Función sensibilidad.

Unidad Temática 4. Métodos de respuesta en frecuencia y estabilidad

Señales senoidales en sistemas lineales. Diagramas de Bode. Análisis de sistemas tipo cero, uno y dos, con y sin ceros. Análisis experimental en el campo de las frecuencias. Diagramas polares (Nyquist). Frecuencia de resonancia. Pico de resonancia. Frecuencia de cruce de la ganancia y de la fase. Ancho de banda. Ejemplos de aplicación.

Métodos para el cálculo de la estabilidad en ingeniería de control: (a) Cálculo de las raíces de la ecuación característica (polos a lazo cerrado); (b) Criterio de Routh-Hurwitz; (c) Criterio de Nyquist. Margen de ganancia y margen de fase. Sistemas de fase mínima y de fase no mínima. Relación entre parámetros de base temporal con los de base frecuencial.



Unidad Temática 5. Método del lugar de las raíces

Polos y ceros en el plano $s=\sigma+j\omega$. Condición de módulo y Fase. Reglas prácticas que facilitan el trazado del Lugar de Raíces. Análisis de sistemas de control SISO mediante el Lugar de Raíces. Lugares geométricos de sobre error constante, tiempo de establecimiento constante y frecuencia natural amortiguada y no amortiguada constante. Efecto del agregado de ceros y polos al sistema analizado sobre el lugar de Raíces. Variación de la ganancia y de constantes de tiempo del numerador (ceros) y del denominador (polos).

Unidad Temática 6. Diseño de sistemas de control

Controladores: proporcional (P), proporcional + integral (PI), proporcional + derivativo (PD), proporcional + derivativo + integral (PID). Dimensionamiento de controladores en el dominio de $s=\sigma+j\omega$ (por el método del Lugar de Raíces) y en el dominio frecuencial $G(\omega)$ (mediante Bode). Diseño de filtros de compensación: adelanto de fase, atraso de fase y adelanto-atraso de fase, en el dominio de $s=\sigma+j\omega$ (por el método del Lugar de Raíces) y en el dominio frecuencial $G(\omega)$ (mediante Bode). Diseño de controladores y filtros para sistemas SISO de lazos múltiples. Realimentación de posición y velocidad. Método de ajuste de controladores PI, PD y PID: Ziegler-Nichols.

Unidad Temática 7. Análisis y diseño por variable de estado

Formas canónicas del modelo de estado. Conceptos de Controlabilidad y Observabilidad. Test de Kalman de Observabilidad y Controlabilidad. Rango de una matriz. Ecuación Característica de un sistema en función del modelo de estado. Diseño de controladores por realimentación de variables de estado (ubicación de polos a lazo cerrado, Fórmula de Ackerman). Observadores de estado completo. Diseño de observadores de estado. Errores y transitorios. Sistemas de seguimiento. Sistemas con múltiples entradas y salidas realimentados (MIMO). Clasificación de observadores de orden completo, ventajas y desventajas de estos.

Unidad Temática 8. Introducción a los sistemas discretos

Introducción. Bucle de control analógico clásico. Cadena clásica del control digital. Señales Discretas. Señales Digitales. Transformada Z Bilateral y Unilateral Z. Analogía con Laplace. Antitransformación. Propiedades de Transformada Z Bilateral y Unilateral. Transformada de Fourier de una secuencia y su relación con Transformada Z. Estabilidad de un sistema discreto lineal e invariante al desplazamiento (SDLIT). Ecuación en diferencias y Función Transferencia. Diagrama en bloques. Estructura Canónica. Representación mediante variables de estado. Función transferencia a partir de modelo de estados. Solución de ecuaciones de estado. Matriz de transición de estados.

Unidad Temática 9. Sistemas discretos a lazo abierto

Muestreo ideal. Transformada de Fourier y Transformada de Laplace de muestreador ideal. Circuito retenedor de orden cero. Muestro y retención de orden cero. Transformada de Laplace Estrellada $E^*(s)$. Cálculo de $E^*(s)$ mediante residuos. Periodicidad en $j\omega$. Mantenedor de Orden 1 y 2. Reconstrucción. Relación de $E^*(s)$ y $E(z)$. Tabla Función de Transferencia Impulso. Ubicación de los muestreadores ideales. Sistemas a lazo abierto vistos como sistemas digitales. Sistemas con retardo de tiempo. Modelos de variable de estado discretas.



Unidad Temática 10. Sistemas discretos a lazo cerrado

Modelos de variable de estado. Respuesta temporal de sistemas realimentados. Transformación del Plano S al Plano Z. Precisión estacionaria. Simulación. Estabilidad. Controlador PID Digital. Diseño mediante lugar de raíces. Diseño basado en la respuesta en frecuencia (Transformada Bilineal). Redes de adelanto y retraso de fase. Criterio de Routh-Hurwitz. Diagramas de Bode. Respuesta frecuencial a bucle cerrado.

Unidad Temática 11. Variable de estado discreta

Controlabilidad y Observabilidad. Transformaciones en el Espacio de Estados. Diseño por ubicación de polos (Ackerman). Observadores de estado completo. Sistemas de seguimiento. Modelos de variable de estado. Respuesta temporal de sistemas realimentados.

Unidad Temática 12. Control óptimo digital

Control óptimo cuadrático instantáneo. Control óptimo cuadrático estacionario. Sistema de seguimiento. Diseño de sistemas óptimos.

DISTRIBUCIÓN DE CARGA HORARIA ENTRE ACTIVIDADES TEÓRICAS Y PRÁCTICAS

Modalidad organizativa de las clases	Horas Reloj totales presenciales	Horas reloj virtuales	Horas totales
Teórica	39	0	39
Formación práctica	57	0	57

Tipo de Prácticas	Horas Reloj totales presenciales	Horas reloj virtuales (sincrónicas) totales	Lugar donde se desarrolla la práctica
Formación experimental	6	0	Laboratorios 105, 108, 109 y 110 del Dpto de Ing. Electrónica UTN.BA sede Medrano
Problemas abiertos de Ingeniería (ABP)	41	0	Laboratorios 105, 108, 109 y 110 del Dpto de Ing. Electrónica UTN.BA sede Medrano
Proyecto y diseño	10	0	Laboratorios 105, 108, 109 y 110 del Dpto de Ing. Electrónica UTN.BA sede Medrano
Otras (*):			



Práctica supervisada			
Total de horas	57		

ESTRATEGIAS DE ENSEÑANZA Y ACTIVIDADES DE APRENDIZAJE

La organización de la asignatura está estructurada en unidades temáticas y está compuesta por dos etapas principales. La primera etapa comprende los fundamentos del análisis de modelos físicos y su descripción en el dominio temporal (ecuaciones diferenciales, variable de estado) y en el dominio frecuencial (Fourier, Laplace, Transformada Z, Transformada Estrellada y Variable de Estado). La segunda etapa se centra en el análisis de sistemas realimentados, su estabilidad, respuesta ante distintos tipos de excitaciones, diseño de controladores y compensadores, en el dominio de Laplace, Fourier y Variable de Estado. En esta segunda parte se introduce también el análisis y diseño de sistemas de control digital. Cada una de las dos etapas está organizada en unidades temáticas (#12). Para cada una de ellas, hay guías de trabajos prácticos a desarrollar por los alumnos y problemas de aplicación a ser programados y simulados en el lenguaje de programación Matlab o mediante Simulink, como así también el desarrollo de trabajos prácticos de laboratorio.

Las modalidades de enseñanza son empleadas según tipo de actividad (teoría y/o práctica, con un sistema de alternancia virtualidad sincrónica y presencial entre ellas). La Cátedra se organiza sobre la base del dictado de clases teóricas, trabajos prácticos, consultas y discusiones correspondientes a las unidades temáticas desarrolladas. Se fomenta el razonamiento y la creatividad por parte de los alumnos. En la asignatura, se puede considerar como columna vertebral epistemológica *la obtención de modelos dinámicos correspondientes a sistemas físicos de variados dominios y su posterior análisis y diseño*. La cátedra considera un excelente medio para favorecer el aprendizaje, el continuo razonamiento guiado por los docentes ya sea durante el desarrollo de los temas teóricos (virtuales sincrónicos), como así también de los prácticos (presenciales físicos). Esto es posible por ser una asignatura de tecnologías aplicadas en la cual, cada tema se desarrolla a partir del planteo del problema y luego, por aplicación de conceptos por lo general conocidos por el alumno a esta altura de la carrera (y aprendidos en desarrollo de Sistemas de Control), se concibe un camino lógico para resolverlo.

En la cátedra, se fomenta un ambiente de acercamiento alumno – docente con el fin de favorecer la desinhibición del estudiante y permitirle una activa intervención durante las clases. En los encuentros sincrónicos se solicita cámara encendida de todos los participantes y uso activo de los foros de Campus como herramienta adicional a su participación en clase solicitando la palabra y abriendo su micrófono. Los tiempos de dictado de la asignatura se dividen en la forma clásica de *teoría* (con ejemplos prácticos de aprendizaje) y *práctica*.

En las clases teóricas el profesor expone los temas en forma oral, apoyándose en el uso de medios de representación, gráficos, esquemas, expresiones matemáticas, y por medio de alternativas informáticas. El Profesor complementa el desarrollo de cada tema teórico con varios problemas de aplicación, a los efectos de mejorar la comprensión de los temas y conceptos. Se fomenta la participación de los alumnos durante toda la clase, y, ya sea al



comienzo o fin de cada instancia *con virtualidad sincrónica*, se evalúan los conceptos adquiridos (con evaluaciones sincrónicas realizadas dentro de la plataforma del Campus Virtual de la asignatura). De esta forma, se puede tener un seguimiento continuo en el proceso de enseñanza–aprendizaje para con los alumnos.

Las clases de trabajos prácticos (presenciales físicas), a cargo de JTP, Ayudante y Profesor, se dictan una vez terminados los temas teóricos que la sustentan. Se plantean sistemas de control reales y se resuelven algunos de ellos en clase, quedando otros para que los estudiantes los analicen y resuelvan individualmente. Posteriormente, Profesor, JTP y eventual Ayudante, corrigen estos problemas y trabajan con los alumnos (en clases y foros de consulta, o práctica presencial posterior), para analizar los posibles errores y/o dificultades.

La cátedra entrega al inicio de cada ciclo lectivo los enunciados de la totalidad de los apuntes teóricos y trabajos prácticos a desarrollar durante el curso (alojados en el Campus Virtual correspondiente). Para los problemas seleccionados a desarrollar por los alumnos, se exige calidad en la elaboración y presentación. Se supone que dichos trabajos son informes técnicos desarrollados por estudiantes que serán futuros profesionales, y, deben estar de acuerdo con dicha categoría en cuanto a su redacción con claridad, prolijidad y homogeneidad de la presentación. El objetivo de esta exigencia se centra en incentivar la expresión oral y escrita por parte de los estudiantes.

Los trabajos prácticos de laboratorio consisten en la determinación experimental de las funciones de transferencia de los elementos que corresponden a lazos de control de posición y velocidad, y, posteriormente al estudio dinámico (temporal y frecuencial) de los mencionados lazos. Para ello, se emplea instrumental de laboratorio acorde y los equipos Feedback disponibles en la Cátedra. Posteriormente los estudiantes emplean los modelos determinados experimentalmente en el Laboratorio, para realizar las simulaciones de los sistemas vistos durante el curso, utilizando software específico (Matlab y Simulink). De esta manera, el estudiante adquiere un panorama completo del ciclo habitual de análisis y diseño de problemas abiertos de la ingeniería en el área de Control.

En cuanto a instrumentos adicionales de aprendizaje, los estudiantes disponen de libros, apuntes de cátedra y capítulos varios en pdf, tanto en la Web del Departamento de Ingeniería Electrónica, como así también en las Aulas Virtuales de cada curso (Campus). En el Campus Virtual de Sistemas de Control se encuentran todos los temas que se dictan, cronograma semanal de actividades, parciales y finales de años anteriores, resolución de algoritmos en Matlab y Simulink, videos informativos de temas específicos y videos formativos de las clases presenciales sincrónicas entre otros.

Finalmente, para el desarrollo de las actividades *con virtualidad sincrónica*, se cuenta con los siguientes instrumentos:

- Plataforma Meet Institucional.
- Plataforma Zoom Institucional.
- Videos de clases prácticas de laboratorio.
- Material teórico y práctico en aula de Campus Virtual.
- Foros de consulta continuo con profesores y auxiliares (Campus Virtual, Slack, grupos de WA, etc.).



MODALIDAD DE EVALUACIÓN

Modalidad

La evaluación continua se realiza habitualmente de dos maneras: a) mediante los trabajos prácticos personales que desarrollan los alumnos durante el curso y b) manteniendo un dialogo que permite durante las clases (tanto teóricas virtuales sincrónicas como prácticas presenciales), evaluar el grado de atención, comprensión y seguimiento de los temas por parte de los estudiantes. Se estima que el alumno avanzará sin dificultades en el aprendizaje de la materia, si pone énfasis en toda la fundamentación teórica de esta, período en el cual el alumno deberá repasar temas ya vistos en su carrera, particularmente análisis operacional (Laplace, Fourier), ecuaciones diferenciales, álgebra lineal, matrices y sistemas físicos dinámicos. Debido a la adecuada cantidad de cursantes, se mantiene un diálogo abierto con los alumnos que permite a profesores y auxiliares evaluar qué aspectos deben ser profundizados y/o reforzados.

Los exámenes parciales (#2), son presenciales, escritos e individuales, y consisten en la resolución de problemas del tenor a los desarrollados en los trabajos prácticos y ejemplos formativos (durante la teoría), con la inclusión de preguntas conceptuales sobre los temas vistos y desarrollos de algoritmos de simulación en Matlab y Simulink.

Requisitos de Regularidad

Para regularizar la asignatura, el alumno deberá aprobar los dos exámenes parciales con una nota igual o superior a 6 (seis). Cada examen parcial contará con dos instancias de recuperación. La nota mínima de aprobación de cada examen recuperatorio será de 6 (seis) puntos. Además de la aprobación de los parciales, los alumnos deberán entregar informes de los Trabajos Prácticos que cada docente de la cátedra considere necesarios, así también como desarrollo y análisis de prácticos de laboratorio.

Requisitos de aprobación directa

La aprobación de la asignatura implica la posibilidad de promoción de esta. Para ello, el alumno deberá aprobar cada uno de los exámenes parciales con nota igual o superior 8 (ocho puntos), con una sola instancia de recuperación de alguno de los 2 parciales. El alumno que desee modificar su nota en un determinado parcial para poder acceder a la promoción de la asignatura (realizando el recuperatorio respectivo), renuncia a la nota actual, aun siendo la misma de aprobación del parcial pero no suficiente para la promoción.

Como instrumento adicional para la promoción, se deben confeccionar y entregar en forma individual trabajos prácticos desarrollados a lo largo del año en la asignatura (que sean indicados por cada cátedra), como así también la aprobación de todas las evaluaciones conceptuales realizadas en las *clases virtuales sincrónicas (en el proceso se seguimiento continuo)*.

En el caso de no promocionar la asignatura (pero sí haberla regularizado), para aprobar la misma, el alumno deberá rendir un examen final consistente en la resolución de problemas



integradores teórico-prácticos (problemas abiertos de la ingeniería de control), obteniendo una nota igual o superior a 6 (seis).

ARTICULACIÓN HORIZONTAL Y VERTICAL CON OTRAS MATERIAS

La asignatura Sistemas de Control (SC) se enmarca en el Área de *Control*. El nivel actual de la carrera, es el *Quinto Nivel*. Componen esta Área la asignatura SC, juntamente con Electrónica de Potencia (EP), Máquinas e Instalaciones Eléctricas (MIE) y de manera tangencial externa Técnicas Digitales II (TD2).

La integración horizontal se realiza con EP, Medidas Electrónicas II (ME2) y Técnicas Digitales III (TD3). La inclusión de tópicos de Control Digital desde el período lectivo 2019 en SC, hace uso del diseño de controladores como filtros digitales y su implementación con microcontroladores o procesamiento paralelo con microprocesadores, conceptos tratados en TD3. Fuentes de error en un lazo cerrado, propagación de errores y estimación de vector de estado con ruido, utilizan conceptos de ME2. La variación de velocidad de motores de CC y CA, utilizando distintos tipos de semiconductores en EP, se contrasta con el control de posición y velocidad de los motores utilizando controladores y compensadores analógicos y digitales.

La articulación vertical inmediata se realiza con MIE, TD2 y Teoría de Circuitos II (TC2). La definición, análisis y síntesis de motores de CC controlados por armadura y/o campo visto en MIE, es de fundamental importancia para el abordaje del control de velocidad con controladores clásicos, tanto conceptual en su génesis, como didáctico en la aplicación de ejemplos y desarrollos de ejercicios. En el caso de TD2, muestreo de señales, conversión A/D y D/A, como así también implementación de filtros digitales en microcontroladores, son conceptos que se utilizan en la última parte de la asignatura, más precisamente en los capítulos correspondientes a una introducción al control digital. Finalmente, el diseño de filtros digitales en las configuraciones FIR e IIR dictados en TC2, son útiles para el diseño de controladores digitales PID, redes de adelanto, retraso y adelanto–retraso. En el tercer nivel de la carrera, la integración vertical inferior se realiza con Teoría de Circuitos I (TC1) y Análisis de Señales y Sistemas (ASyS). El análisis de circuitos mediante técnicas de variable de estado, tanto en dominio temporal como frecuencial complejo, respuesta en frecuencia de circuitos y análisis con diagramas asintóticos de Bode, como así también su análisis e implementación en Matlab y Simulink, son temas muy importantes en Sistemas de Control, dictados en TC1. La inclusión de todos estos temas permite optimizar en gran medida, la primera parte de la asignatura objeto de este documento. Modelización (serie y paralelo), análisis y síntesis de sistemas físicos, ya sea en el dominio temporal (ecuaciones diferenciales, convolución, ecuaciones en diferencia), como frecuenciales (transformada de Fourier, Laplace y Z), son temáticas de ASyS que se utilizan profusamente durante todo el dictado de SC, siendo esta asignatura de articulación vertical inferior una de las que más conceptos y herramientas de análisis brinda a SC.

La articulación vertical superior, se realiza con la electiva del sexto nivel de la carrera, Control Moderno. Esta asignatura sigue la línea de SC, profundizando el uso de observadores de estado, técnicas de diseño de Control Robusto y diseño de controladores digitales.

Como puede observarse, existe una elevada articulación vertical y horizontal de SC con varias asignaturas de la carrera, desde tecnologías básicas, aplicadas hasta incluso, complementarias.



Otras asignaturas como Electrónica Aplicada II, también son útiles para SC, así también como Medidas Electrónicas I, convirtiendo a SC una de las asignaturas más integradoras de la carrera de Ingeniería Electrónica.

Finalmente, se indica a continuación, la situación académica del alumno para poder cursar y aprobar Sistemas de Control mediante examen Final (en caso de no haber accedido al sistema de promoción):

Correlativas:

Para cursar:

Tener regularizadas las siguientes asignaturas:

- ✓ Teoría de Circuitos II.
- ✓ Máquinas e Instalaciones Eléctricas.

Tener aprobadas las siguientes asignaturas:

- ✓ Física Electrónica.
- ✓ Teoría de Circuitos I.

Para Rendir:

Tener aprobadas las siguientes asignaturas

- ✓ Teoría de Circuitos II.
- ✓ Máquinas e Instalaciones Eléctricas.

CRONOGRAMA ESTIMADO DE CLASES

Clase	Tema	Modalidad de dictado
1	Introducción a la asignatura. Cronograma y fecha de parciales. Condiciones de regularización y promoción. TEORÍA <u>Unidad Nº 1 (Parte #1).</u> Introducción a los Sistemas de Control Estructuras típicas en las cadenas de sistemas de control. Representación de Sistemas Lineales e Invariantes en el Tiempo (SLIT), pros y contras de TODOS (condición inicial, dificultad, entradas y salidas, etc.). Funciones iniciales MATLAB. Ejemplos de todo lo desarrollado en clase.	Presencial
2	TEORÍA y PRÁCTICA <u>Unidad Nº 1 (Parte #2).</u> Introducción a los Sistemas de Control Teoría de diagrama de bloques en Laplace. Diagrama de flujos. Ganancia de Mason. Linealización de sistemas. Ejemplos de todo lo desarrollado en clase.	Virtualidad Sincrónica
3	PRÁCTICA <u>Trabajo Práctico #1.</u> Introducción a los Sistemas de Control. Matlab y Simulink. Resolución de ejercicios de la guía de trabajos prácticos.	Presencial
4	TEORÍA y PRÁCTICA <u>Unidad Nº 2 (Parte #1).</u> Modelado de Sistemas Traslacionales y Rotacionales Modelización Física de Sistemas. Generalidades. Modelización de sistemas traslacionales. Modelización de sistemas rotacionales. Ejemplos de todo lo desarrollado en clase.	Virtualidad Sincrónica



5	PRÁCTICA Trabajo Práctico #2. Modelado de sistemas traslacionales y rotacionales. Modelo de Laplace y variable de estado de Péndulo Invertido. Resolución de ejercicios de la guía de trabajos prácticos. Programación en Matlab y Simulink.	Presencial
6	TEORÍA Unidad Nº 2 (Parte #2). Modelado de Sistemas electromecánicos Diagrama de flujos de estado con condiciones iniciales. Motor de CC controlado por inducido. Motor de CC controlado por campo. Generador de CC. Ecuaciones de movimiento temporales. Análisis de torque máximo. Linealización de campo y rotor.	Virtualidad Sincrónica
7	PRÁCTICA Trabajo Práctico #3. Modelado de sistemas electromecánicos. Generador y Motor. Desarrollo de ejercicios del trabajo práctico. Diagramas con Simulink y simulación de estos.	Presencial
8	TEORÍA Unidad Nº 2 (Parte #3). Modelado de Sistemas Hidráulicos y Calóricos Sistemas hidráulicos: variables presión y caudal. Sistemas hidráulicos clásicos: variables altura y caudal. Ejemplos de modelización. Actuador hidráulico integral (con palancas) Ejemplos de aplicación. Sistemas térmicos: variables temperatura y flujo calórico. Ejemplos de desarrollo.	Virtualidad Sincrónica
10	PRÁCTICA Trabajo Práctico #4. Modelado de sistemas hidráulicos y térmicos. Resolución de ejercicios de la guía de trabajos prácticos.	Presencial
11	TEORÍA Unidad Nº 3. Respuesta Transitoria y Permanente de Sistemas Realimentados Sistemas de primer orden: respuesta al escalón y a la rampa. Sistemas de segundo orden: ubicación de polos. Distintos regímenes. Sobrepaso y tiempo de establecimiento. Concepto de polo dominante. Orden 3 o superior. Influencia de los ceros cerca de los polos dominantes en la respuesta transitoria. Error actuante y error verdadero. Errores a la posición, velocidad y aceleración. Tablas de error. Importancia de las constantes de error. Perturbaciones. Sensibilidad paramétrica. Ejemplos de aplicación.	Virtualidad Sincrónica
12	PRÁCTICA Trabajo Práctico #5. Respuesta Transitoria y Permanente. Desarrollo de ejercicios.	Presencial
13	TEORÍA y PRÁCTICA Unidad Nº 4. Respuesta Frecuencial de Sistemas Realimentados (Bode y Nyquist) Estabilidad absoluta. Revisión de Bode. Sistemas Tipo 0, 1 y superior. Cálculo de constantes de error. Margen de Fase y Margen de Ganancia. Gráficos polares. Teorema fundamental de variable compleja. Teorema de la estabilidad de Nyquist. Ejemplos de aplicación.	Virtualidad Sincrónica
14	PRÁCTICA Trabajo Práctico #6. Respuesta Frecuencial. Resolución de ejercicios conceptuales de estabilidad con Nyquist. Clase de consultas previa al primer examen parcial.	Presencial
15	EVALUACIÓN Primer Examen Parcial. Evaluación de Unidades 1 a 4 inclusive.	Presencial
16	TEORÍA y PRÁCTICA Resolución y análisis del Primer Examen Parcial Unidad Nº 5. Método del Lugar de Raíces Condición de magnitud y fase. Reglas de construcción. Efecto de polos y ceros en el lugar de raíces. Desarrollo de ejemplos de construcción.	Virtualidad Sincrónica
17	PRÁCTICA	Presencial



	Trabajo Práctico #7. Desarrollo de ejercicios de lugar de raíces. Uso de las funciones Matlab rlocus; rlocfind y sgrid.	
18	TEORÍA Unidad Nº 6 (Parte #1). Diseño de sistemas de Control mediante LR Compensadores y Controladores. Compensación serie y paralelo. Redes de adelanto de fase. Diseño en frecuencia. Redes de atraso de fase. Red de adelanto-retraso ¿cuándo usarla? Ejemplos de diseño de compensadores con LR. Red activa de implementación de compensadores. Ejemplos de diseño de compensadores con lugar de raíces.	Virtualidad Sincrónica
19	TEORÍA Unidad Nº 6 (parte #2). Diseño de sistemas de Control mediante LR Controladores clásicos: P, PI, PD, PID, PID modificado. Transferencias y circuito eléctrico equivalente de diseño. Ejemplos de diseño. PRÁCTICA Trabajo Práctico #8a. Diseño de Controladores con LR. Resolución de ejercicios conceptuales y computacionales.	Presencial
20	TEORÍA Unidad Nº 6 (Parte #3). Diseño de Controladores en el dominio de la frecuencia Revisión de Margen de Fase y Margen de Ganancia. Retardo de Transporte. Cálculo de orden. Padé con Matlab. Compensador en adelanto, retraso y adelanto-retraso. Criterios de diseño. Ejemplos de diseño de compensadores en frecuencia analíticos y con Matlab	Virtualidad Sincrónica
22	PRÁCTICA Trabajo Práctico #8b. Controladores en el dominio de la frecuencia. Resolución de ejercicios del trabajo práctico analítico y con Matlab.	Presencial
24	PRÁCTICA Trabajo Práctico de Laboratorio. Trabajo Práctico de Laboratorio. Desarrollo de trabajos prácticos de laboratorio. Determinación de parámetros de motor de CC y Control de este.	Presencial
25	TEORÍA Unidad Nº 7 (Parte #1). Diseño de controladores por realimentación del vector de estado Solución ecuación de estado. Modelos SISO canónico controlable y canónico observable. Controlabilidad del vector de estado. Realimentación del vector de estados. Ecuación de Ackerman. Reguladores. Uso de Matlab y Simulink.	Virtualidad Sincrónica
26	TEORÍA Unidad Nº 7 (Parte #2). Diseño de controladores por realimentación del vector de estado Observación de Estado Completo. Tipo de observadores (serie, paralelo, estimación del control). PRÁCTICA Trabajo Práctico #9. Diseño de Controladores con Variable de Estado. Resolución de ejercicios. Matlab y Simulink.	Presencial
27	TEORÍA Unidad Nº 8. Sistemas discretos y digitales. Representación Revisión Transformada Z. Representación de sistemas discretos: ecuación en diferencias, diagrama en bloques, variable de estado. Solución temporal estados y salidas. Matriz de transferencia discreta.	Virtualidad Sincrónica
28	TEORÍA Unidad Nº 9. Sistemas Digitales a Lazo Abierto. Revisión del Teorema del Muestreo. Transformada de Laplace estrellada (TLE). Relación de TLZ con Transformada Z (TZ). Circuitos retenedores de orden cero y orden superior. Cálculo de TLE mediante residuos. Cálculo de TLE mediante TZ de señales muestreadas.	Presencial



	Función transferencia discreta. Ubicación de muestreadores ideales. Plantas continuas con filtros digitales. Discretización de plantas continuas. Uso de Matlab. PRÁCTICA <u>Trabajo Práctico #10 y Trabajo Práctico #11.</u> Análisis de Algoritmos y ejercicios conceptuales de los trabajos prácticos #10 y #11.	
29	TEORÍA <u>Unidad Nº 10. Sistemas discretos a lazo cerrado. Controladores Digitales.</u> Ganancia a lazo cerrado. Mapeo de plano S a plano Z. Exactitud en régimen permanente. Estabilidad de sistemas discretos. Transformación bilineal. Análisis y diseño mediante lugar de raíces. Diseño de Compensadores y controladores digitales en frecuencia.	Virtualidad Sincrónica
30	PRÁCTICA <u>Trabajo Práctico #12.</u> Análisis de Algoritmos y ejercicios conceptuales. Uso intensivo de Matlab y Simulink.	Presencial
31	TEORÍA <u>Unidad Nº 11 y 12. Variable de Estados Discreto. Control Óptimo</u> Controlabilidad y observabilidad del vector de estados discreto. Diseño por ubicación de polos. Estimador completo de estados. Realimentación de estado discreto con entrada de referencia. Ecuaciones de estado a lazo cerrado. Control óptimo analógico y digital. PRÁCTICA <u>Trabajo Práctico #13.</u> Análisis de Algoritmos y ejercicios conceptuales. Uso intensivo de Matlab y Simulink. <u>Trabajo Práctico #14.</u> Análisis de Algoritmos y ejercicios conceptuales. Uso de Matlab.	Virtualidad Sincrónica
32	EVALUACIÓN <u>Segundo Examen Parcial.</u> Evaluación de Unidades 5 a 12 inclusive.	Presencial

BIBLIOGRAFÍA OBLIGATORIA

- ✓ DORF, R. & Bishop, R. (2020). *Modern Control Systems, Fourteenth Edition*. USA. Prentice Hall.
- ✓ Kuo, B. & Hanselman, D. (2007). *MATLAB Tools for Control System Analysis and Design*. USA: Pearson Education.
- ✓ Ogata, K. (2003). *Ingeniería de control moderna*. USA: Pearson Education.
- ✓ Kuo, B.C. (2001). *Automatic Control Systems*. USA: Prentice Hall, NJ.
- ✓ Ogata, K. (1999). *Problemas de Ingeniería de Control utilizando MATLAB*. USA: Pr. Hall.
- ✓ Chen, Chi-Tsong. (1999). *Lineal System Theory and Design*. USA. Oxford University Press.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

- ✓ Philips, C. & Nagle, H. (2007). *Digital Control Systems*. USA: Prentice Hall, NJ.



Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional Buenos Aires

- ✓ Mariani, A. (2007). *Guía de Trabajos Prácticos*, Rev. 2.
- ✓ Navarro Viadana, R. (2006). *Ingeniería de Control Analógica y Digital*- México: McGraw-Hill Interamericana.
- ✓ Bolton, W. (2001). *Ingeniería de Control*. México: Alfaomega 2ª edición,
- ✓ González, H. y Mariani, A. (2000). *Sistemas de Control*, Vol. 1 y Vol. 2. 3ª Argentina Editorial Nexus
- ✓ Goodwin, G., Graebe, S. & Salgado, M. (2000). *Control Systems*. USA. Prentice Hall Ptr, Upper Saddle River, NJ.
- ✓ BAY, J. (1999). *Fundamentals of Lineal Space State Systems*. WCB/McGraw Hill.
- ✓ Belanger, P. (1995), *Control Engineering: A Modern Approach*. Saunders College Publishing. Mc Graw Hill University.
- ✓ Ogata, K (1995). *Discrete-Time Control Systems*. USA: Pearson Education.
- ✓ Truxal, J.G. (1995). *Automatic Feedback Control Systems Synthesis*. McGraw-Hill, NY.
- ✓ Bishop, R. (1993). *Modern Control Systems Analysis and Design Using MATLAB*, Addison-Wesley.
- ✓ Doyle, J.C., Francis, B.A, Tannenbaum, A.R. (1992). *Feedback Control Theory*. MacMillan Publishing Company, N.Y.
- ✓ Distefano, J., Stubberud, A.R. and Williams, I. (1990). *Feedback and Control System*. McGraw-Hill, N.Y.
- ✓ Friedland, B. (1989). *Control System Design: An Introduction to Space State Methods*. USA. Mc Graw Hill.

APUNTES DE CÁTEDRA:

- ✓ Pessana, F. (2021). *Introducción al Control Digital*. Apunte de Cátedra, BA.