



Guía para el profesor

Control Digital

MR13201



Índice

Información general del curso	1
Certificados	1
Metodología	2
Temario	6
Recursos especiales.....	9
Evaluación.....	10
Notas de enseñanza	11
Evidencia.....	26
Bibliografía y recursos especiales.....	32
Tips importantes.....	33

Información general del curso

Modalidades

- Clave banner: MR13201
- Modalidad: Presencial

Competencias del curso

Identifica y diseña parámetros característicos de controladores digitales para aplicarlos en procesos continuos o discretos de tipo lineales, univariantes y multivariantes.



Certificados

No aplica.



Metodología

1. Características del curso

- El curso se imparte con la técnica didáctica de *Aula Invertida*.
- Tiene una competencia y tres evidencias (una para cada módulo).
- Está conformado por tres módulos distribuidos en 15 temas que integran su contenido.
- Se desarrollan actividades dentro del aula (individuales o en equipo) y actividades previas que tiene que realizar el alumno para acudir preparado a clase (con excepción de la primera sesión).
- Se aplican exámenes rápidos y exámenes parciales.

2. Estructura del curso



Módulo 2:



Evidencia módulo 2

Competencia del curso

Módulo 1:



Evidencia módulo 1

3. Modelo didáctico

El modelo educativo de la Universidad Tecmilenio, cuya visión es "Formar personas con propósito de vida y las competencias para alcanzarlo", está enfocado en el desarrollo de competencias que distingan a sus alumnos y los capaciten para actuar ante diversos contextos, previstos o impredecibles, dado que vivimos en constante cambio, empoderándolos para ser autoaprendices y para aprender a aprender. Todo esto para su florecimiento humano, tomando en cuenta los elementos del Ecosistema de Bienestar y Felicidad de la Universidad.

Nuestra meta más importante en el aula es lograr un aprendizaje centrado en el alumno, por lo cual, el modelo que seguimos para el diseño e impartición de cursos es también *constructivista*, al presentar un cambio en los roles:

- *Los alumnos* obtienen las bases para hacer una interpretación de la realidad y construir su propio conocimiento, al aprender haciendo (no solamente viendo, escuchando y leyendo).
- *Los profesores*, al ser expertos en su disciplina y trabajar en la industria, aportan su experiencia laboral para guiar a los alumnos y construir ambientes de aprendizaje en contextos reales que los motiven a aprender, enriqueciendo así, su experiencia de aprendizaje.

Con esta visión constructivista se ha incorporado la técnica didáctica de Aula Invertida para apoyar el aprendizaje activo. En seguida se explica la modalidad de este curso:

Modalidad: Aula Invertida con ciclo semanal

Los alumnos, comprometiéndose con su aprendizaje, realizan actividades previas o requerimientos *antes de la clase* para introducirlos a los conceptos que aplicarán en el aula. Cabe aclarar que, con el objetivo de incentivar y evaluar lo realizado previamente, los profesores deben desarrollar y aplicar comprobaciones de que efectivamente se llevó a cabo. De esta manera, cuando los alumnos acudan al aula estarán más preparados para aclarar dudas, explorar, practicar, comprender la experiencia de sus profesores y ser guiados por ellos en la realización de actividades que buscan crear valiosas experiencias y oportunidades para el aprendizaje personal, al involucrar, estimular y retar a los alumnos en el descubrimiento de respuestas.

A continuación, se detallan las fases de esta modalidad:



4. Cómo impartir el curso

El profesor debe revisar a fondo las actividades antes de que las realicen los alumnos y conocer todos los aspectos teóricos involucrados (capítulos de libros de texto o de apoyo y recursos), para brindar una respuesta o ayuda oportuna a los estudiantes dentro del modelo constructivista. Asimismo, debe indicar a los alumnos la información

que requieren estudiar y buscar en Internet para que puedan llevarla a las sesiones de clase, en caso de que se requiera.

A partir del tema 1, los alumnos se prepararán antes de la clase estudiando los temas a tratar incluyendo sus recursos, además, en algunas ocasiones, tendrán que realizar algún ejercicio como parte de la actividad previa o del apartado de requerimientos.

El profesor debe desarrollar y aplicar comprobaciones de lo que los alumnos debieron realizar previamente y luego iniciar su clase con una breve explicación de la actividad y una visión general de los conceptos más importantes en los que los alumnos deben enfocar su atención. Considerando esta explicación, los alumnos inician su trabajo y el profesor monitorea su avance (no al frente del grupo, sino caminando entre las mesas y en ocasiones sentándose al lado de los alumnos para observar su trabajo), tratando de no interrumpir los procesos de aprendizaje, pero guiando la actividad para que los alumnos se enfoquen en lo que están haciendo.

Es muy importante que el profesor transmita a los alumnos sus experiencias relacionadas con los temas y aclare dudas.

Los *exámenes parciales o de medio término* se desarrollarán por el profesor impartidor (considerando el contenido del curso), y pueden ser teóricos o prácticos.

 **Temario**

Tema 1	Introducción al control digital
1.1	Panorama general
1.2	Estructura de un sistema de control digital
1.3	Ventajas y desventajas de un sistema de control digital
Tema 2	Sistemas discretos
2.1	¿Qué es un sistema discreto?
2.2	Señales discretas básicas
Tema 3	Sistemas de control muestreados
3.1	Muestreo de señales
3.2	Teorema de muestreo
3.3	Retenedores de señales
Tema 4	Transformada Z
4.1	Definición
4.2	Transformada Z de funciones elementales
4.3	Propiedades de la transformada Z
4.4	Transformada Z modificada
Tema 5	Transformada Z inversa
5.1	Definición
Tema 6	Función de transferencia de sistemas de control discreto
6.1	Definición
6.2	Ecuación de diferencias característica
6.3	Respuesta en tiempo a entradas conocidas
6.4	Álgebra de bloques
Tema 7	Estabilidad en sistemas discretos
7.1	Zonas de estabilidad en el plano Z
7.2	Criterios de estabilidad

Tema 8	Identificación de sistemas
8.1	Definición
8.2	Curva de reacción
8.3	Errores en estado estacionario
Tema 9	Sistemas de alto orden
9.1	Técnica de mínimos cuadrados para identificación paramétrica determinística de sistemas
9.2	Aspectos prácticos para la selección del orden, la estructura y la validación del modelo del sistema a identificar
Tema 10	Equivalentes discretos de funciones de transferencia
10.1	Definición
10.2	Equivalente discreto por retenedor de orden cero (ZOH)
10.3	Equivalente discreto por el método de transformación de Tustin
Tema 11	Controlador PID
11.1	Acciones básicas de control
11.2	Sintonización de controladores PID
11.3	Controladores PID digitales
Tema 12	Controladores digitales
12.1	Técnicas de control moderno
12.2	Controladores no convencionales
12.3	Efecto timbre en los controladores discretos
12.4	Diseño de controladores discretos usando cancelación de polos y ceros
12.5	Técnicas de respuesta a la frecuencia en controladores discretos PID
Tema 13	Variables de estado discreto
13.1	Variables de estado discreto
13.2	Solución a la ecuación de estado discreto
13.3	Discretización de sistemas continuos
13.4	Estabilidad
Tema 14	Diseño en el espacio de estados discretos

14.1 Controlabilidad

14.2 Observabilidad

14.3 Diseño de reguladores por retroalimentación de estados

Tema 15 | Control multivariable

15.1 Función de transferencia de un sistema multivariable

15.2 Realización en variables de estado de sistemas multivariables

15.3 Acoplamiento y desacoplamiento



Recursos especiales

No aplica.



Evaluación

Unidades	Instrumento evaluador	Porcentaje
19	Actividades	40
3	Evidencias	20
1	Primer examen parcial	10
1	Segundo examen parcial	10
1	Evaluación final	20
	Total	100



Notas de enseñanza

Tema 1

El propósito de este tema es introducir a los estudiantes al campo del control digital, destacando su importancia en el contexto de la revolución tecnológica actual. Se abordarán los fundamentos del control digital, diferencias con el control analógico, y se discutirán sus aplicaciones prácticas, especialmente en sistemas computarizados.

Comienza la sesión destacando cómo la inteligencia artificial, IoT y la computación en la nube están redefiniendo el panorama tecnológico y su relevancia en el control digital. Usa ejemplos de la vida real para ilustrar la omnipresencia de los sistemas de control digital, como los sistemas autónomos de vehículos o la automatización de procesos industriales.

Define el control digital y explica su importancia en la mejora de la precisión, velocidad, y eficiencia de los sistemas controlados. Relata la historia del control por computadora, mencionando ejemplos clave como la refinería de Texaco y el esquema DDC de ICI. Ilustra la diferencia entre señales analógicas y digitales, utilizando diagramas o animaciones para explicar la conversión A/D y D/A. Discute la importancia de las señales discretas en el control digital, apoyándose en ejemplos para proporcionar una base teórica sólida.

Mediante un diagrama de bloques, explica cómo se integra una computadora en un sistema de control digital, destacando el papel del ADC, DAC, y el controlador digital. Puede usar un ejemplo práctico, como el control de la velocidad de un motor mediante PWM, para ilustrar la aplicación de un microcontrolador en control digital.

Fomenta la discusión en clase sobre cómo estas características impactan el diseño y la implementación de sistemas de control en diferentes industrias. Resalta cómo el control digital se ha integrado en diversos aspectos de la vida moderna y su impacto en la eficiencia, precisión y economía de los procesos. Anima a los estudiantes a reflexionar sobre el futuro del control digital y su potencial para seguir transformando la tecnología y la sociedad.

Fomenta la interacción y la participación de los estudiantes, proponiendo preguntas abiertas sobre cómo ven la aplicación del control digital en su entorno. Mantén una actitud abierta a las dudas y fomenta un ambiente de aprendizaje colaborativo donde los estudiantes se sientan cómodos compartiendo sus ideas y preguntas.

Tema 2

En este tema los estudiantes deben comprender los fundamentos de los sistemas de control digital, enfocándose en el análisis de señales discretas. Deberán ser capaces de diferenciar entre sistemas continuos y discretos, reconocer la importancia de las señales discretas en el control digital y aplicar estos conocimientos en el diseño de sistemas de control.

Explica la forma en que opera un sistema discreto, a diferencia de los sistemas continuos. Utiliza ejemplos simples como un reloj digital que avanza en segundos, para ilustrar cómo se manejan las señales en intervalos discretos. **Actividad sugerida:** realiza un ejercicio donde los estudiantes conviertan una función continua en su forma discreta.

Durante la sesión de clases describe las señales discretas básicas: impulso unitario, escalón unitario, rampa unitaria, función coseno y exponencial discreta. Muestra cómo se representan matemática y gráficamente (si lo consideras necesario da un pequeño repaso de programación en Python y da las librerías más importantes que estarán utilizando durante el curso).

Fomenta una discusión sobre cómo los sistemas discretos se aplican en diferentes contextos, como la automatización industrial y las tecnologías emergentes. Pide a los estudiantes que identifiquen ejemplos de su vida cotidiana donde se utilicen estos sistemas.

Para mostrar los contrastes entre señales continuas y discretas utiliza ejemplos visuales y tablas comparativas. Si lo deseas puedes mostrar cómo son sus diferencias en la representación gráfica, el manejo matemático y las aplicaciones prácticas. Invita a los estudiantes a reflexionar sobre por qué es importante convertir señales de continuas a discretas en el contexto de control digital.

Realiza una demostración en vivo de cómo utilizar herramientas de programación para analizar y diseñar sistemas de control digital. Muestra cómo estas herramientas pueden simular el comportamiento de señales discretas y sistemas de control. Organiza una actividad práctica donde los estudiantes puedan experimentar con estas herramientas, diseñando y analizando señales y sistemas discretos básicos. Realiza evaluaciones cortas al final de la sesión para medir la comprensión de los conceptos fundamentales.

Tema 3

Comienza la sesión con una breve introducción sobre la importancia de los sistemas de control muestreados en la ingeniería moderna. Enfatiza cómo estos sistemas permiten la interacción entre el mundo analógico y digital, lo cual es fundamental en aplicaciones que van desde la automatización industrial hasta la electrónica de consumo.

Ilustra con ejemplos la diferenciación entre las señales analógicas y digitales, utilizando diagramas para explicar la estructura general de un sistema de control muestreado. Usa ejemplos cotidianos para que los estudiantes visualicen la aplicación de estos conceptos.

Desarrolla ejercicios interactivos para explorar diferentes tasas de muestreo utilizando software de procesamiento de señales. Permite que los estudiantes experimenten cómo varía la calidad de la señal reconstruida con diferentes intervalos de muestreo.

Utiliza visualizaciones gráficas para explicar la relación entre la frecuencia de muestreo y la frecuencia máxima de la señal. Esto puede ayudar a los estudiantes a comprender intuitivamente el concepto antes de introducir las formulaciones matemáticas. Organiza una discusión sobre las implicaciones prácticas del teorema de muestreo en el diseño de sistemas de control digital.

Facilita una demostración en vivo o un video que muestre el funcionamiento interno de los dispositivos ADC y DAC. Esto podría incluir experimentos simples que muestren la conversión de señales analógicas a digitales y viceversa. Presenta ejemplos prácticos que ilustren cómo los retenedores de señales facilitan la reconstrucción de señales en sistemas de control digital. Compara visualmente señales reconstruidas utilizando diferentes órdenes de retenedores.

Realiza una actividad de grupo donde los estudiantes deriven la función de transferencia de un ZOH a partir de principios básicos. Posteriormente, utiliza software de simulación para validar sus cálculos mediante la comparación de resultados teóricos y prácticos.

Anima a los estudiantes a pensar en aplicaciones futuras de los sistemas de control muestreados en tecnologías emergentes y en cómo los principios aprendidos pueden aplicarse a nuevos problemas de ingeniería.

Tema 4

Puedes comenzar este tema con una visión general, destacando la importancia de la transformada Z en el análisis y diseño de sistemas de control digital. Subraya cómo esta herramienta matemática facilita la transición de señales en el tiempo discreto al dominio de la frecuencia, y su relevancia en campos como el procesamiento de señales y telecomunicaciones.

Introduce la definición de la transformada Z, utilizando ejemplos visuales o diagramas para ilustrar la conversión de señales del tiempo discreto al dominio de la frecuencia. Es crucial usar un lenguaje accesible y ejemplos cotidianos para explicar conceptos como la causalidad y las series geométricas.

Ejercicios prácticos sugeridos:

- Realizar transformadas Z de señales simples, como el impulso y el escalón unitarios, para familiarizar a los estudiantes con el proceso.
- Resolver problemas que apliquen la definición de serie geométrica en el contexto de la transformada Z, reforzando la comprensión teórica con aplicaciones prácticas.

Discutir los criterios para determinar si una función tiene transformada Z, usando ejemplos gráficos para ilustrar el concepto de crecimiento más rápido que una función exponencial.

Ejercicios prácticos sugeridos:

- Analizar diferentes funciones matemáticas y determinar si tienen transformada Z.
- Calcular la transformada Z de funciones elementales proporcionadas en el contenido del curso.

Presentar las propiedades de la transformada Z, como la linealidad y el desplazamiento en el tiempo. Utiliza ejemplos prácticos para demostrar cómo estas propiedades simplifican el análisis de sistemas de control digital.

Ejercicios prácticos sugeridos:

- Aplicar las propiedades de la transformada Z para simplificar cálculos en ejercicios seleccionados.

Explica la necesidad y aplicación de la transformada Z modificada, especialmente en contextos que involucran retardos o tiempos muertos.

Ejercicios prácticos sugeridos:

- Calcular la transformada Z modificada para funciones dadas, destacando la adaptación a señales con retardos.
- Comparar resultados entre la transformada Z estándar y la modificada para la misma función, resaltando las diferencias y aplicaciones.

Concluye con un resumen del tema, enfatizando la importancia de la práctica constante. Anima a los estudiantes a explorar aplicaciones de la transformada Z en proyectos o investigaciones propias.

Explicar la importancia de la transformada Z inversa en el análisis de sistemas de control digital y cómo permite regresar de la representación en el dominio de la frecuencia a la secuencia de tiempo original. Iniciar con una breve revisión de la transformada Z para establecer una base sólida. Luego, introducir el concepto de la transformada Z inversa, destacando su necesidad y aplicaciones en el control digital.

Detallar el proceso de aplicación del método de fracciones parciales para simplificar la expresión de $F(z)$ y facilitar la aplicación de la transformada Z inversa.

Ejercicios prácticos sugeridos:

- Proporcionar un ejemplo paso a paso de cómo aplicar el método de fracciones parciales en casos de polos reales no repetidos, polos reales repetidos, y polos complejos no repetidos.
- Demostrar cómo utilizar herramientas de software como Python y la librería SciPy para descomponer una función de transferencia en fracciones parciales y obtener su transformada Z inversa.

Después de explicar cada caso (polos reales no repetidos, polos reales repetidos, polos complejos no repetidos), realizar ejercicios prácticos para reforzar el aprendizaje. Incluir ejercicios donde los estudiantes puedan aplicar Python para calcular la transformada Z inversa utilizando la función `signal.residue` y convertir números complejos a su forma polar con `cmath.polar`.

Fomentar la discusión sobre los resultados obtenidos, especialmente en la interpretación de los polos y ceros y su relación con la estabilidad y respuesta dinámica del sistema. Recapitular los puntos clave del tema, enfatizando la importancia de comprender y aplicar correctamente la transformada Z inversa en el análisis y diseño de sistemas de control digital.

Tema 6

El objetivo de este tema es comprender el análisis de sistemas lineales en tiempo discreto usando la transformada Z, la importancia de la función de transferencia en el lazo de control y la forma en que estas herramientas se aplican en el diseño de sistemas de control digital.

Comenzar explicando la importancia de la transformada Z en el análisis y diseño de sistemas de control discreto. Usar ejemplos sencillos para ilustrar cómo la transformada Z convierte operaciones de convolución en el tiempo en multiplicaciones simples en el dominio de la frecuencia. Detallar cómo se deriva la función de transferencia $H(z)$ a partir de la relación entre la señal de entrada y salida, haciendo énfasis en el proceso de convolución y su simplificación mediante la transformada Z. Proporcionar ejemplos de cómo interpretar una función de transferencia en términos de la respuesta del sistema a

diferentes entradas. Explicar la ecuación de diferencias como una relación fundamental en el análisis de sistemas en tiempo discreto.

Presentar la ecuación de diferencias característica de un sistema y cómo esta se relaciona con la función de transferencia mediante la transformada Z. Ilustrar cómo calcular la respuesta de un sistema a diferentes tipos de entradas (impulso, escalón, rampa) usando la función de transferencia. Realizar ejercicios en clase donde los estudiantes calculen y grafiquen la respuesta de un sistema a una entrada dada.

Discutir cómo se aplican los principios del álgebra de bloques en sistemas discretos, comparando con sistemas continuos. Realizar un ejercicio de diseño donde los estudiantes combinen bloques en serie y paralelo para lograr una función de transferencia deseada. Utiliza ejemplos del mundo real y aplicaciones prácticas para ilustrar cómo se utilizan estos conceptos en la ingeniería de control.

Tema 7

Durante el desarrollo de este tema se espera que los alumnos sepan comprender el concepto de estabilidad en sistemas discretos, distinguir entre las zonas de estabilidad en el plano Z y su correlación con el plano S y aplicar los criterios de estabilidad de Routh-Hurwitz y Jury en el análisis de sistemas discretos.

Iniciar la sesión recordando los conceptos básicos de estabilidad en sistemas continuos, enfatizando la importancia de la estabilidad en el diseño de sistemas de control. Explica cómo el análisis se modifica cuando pasamos de sistemas continuos a sistemas discretos, subrayando la diferencia entre los planos S y Z. Describir cómo para que un sistema discreto sea estable, todas las raíces del polinomio característico deben tener una magnitud menor que 1.

Ejercicio práctico sugerido:

- Proporcionar ejemplos de polinomios característicos y pedir a los estudiantes que calculen las raíces para determinar si el sistema es estable.

Introducir el concepto de la esfera de Riemann y su aplicación en el mapeo de funciones complejas. Utilizar algún software matemático para mapear puntos del plano S al plano Z y viceversa, observando cómo la estabilidad se representa en ambos planos.

Explica la diferencia entre estabilidad relativa y absoluta, y su importancia en el análisis de sistemas de tiempo discreto. Si tienes oportunidad revisa un ejemplo de sistema de control discreto específico y

discute su estabilidad relativa y absoluta basándose en la ubicación de sus polos. No olvides proporcionar enlaces o referencias a simuladores en línea o software que permita a los estudiantes experimentar con el mapeo de polos y ceros en el plano Z. Recomienda lecturas complementarias de los textos citados para profundizar en los conceptos discutidos.

Tema 8

Comienza con una breve introducción sobre la importancia de la identificación de sistemas en la ingeniería de control. Explica cómo este proceso permite diseñar controladores adecuados para procesos o fenómenos físicos y químicos cuyas características dinámicas necesitamos conocer. Utiliza ejemplos reales de la industria para ilustrar la necesidad de identificar las características dinámicas de los sistemas.

Define la identificación de sistemas y explica por qué es un método alternativo valioso para obtener el modelo matemático de un proceso. Destaca los casos en los que es recomendable aplicar la identificación de sistemas, como cuando los procesos son difíciles de modelar o cuando los modelos teóricos asumen condiciones ideales no realistas. Describe detalladamente el método de curva de reacción, incluyendo el proceso de introducir una perturbación tipo escalón y registrar la respuesta del sistema. Presenta la figura 1 (Curva de respuesta en tiempo usando una entrada escalón) para ilustrar el proceso.

Explica cómo identificar y modelar sistemas de primer orden usando la curva de reacción. Incluye una discusión sobre cómo calcular la ganancia del sistema (K) y la constante de tiempo (α) a partir de la respuesta al escalón unitario. Utilizar la figura 2 (respuesta de un sistema de primer orden a un escalón unitario) para explicar gráficamente estos conceptos.

Introduce los sistemas de segundo orden y describe cómo su respuesta al escalón difiere de la de los sistemas de primer orden, incluyendo el concepto de sobretiro y oscilaciones amortiguadas. Presenta la figura 5 (Respuestas de sistemas de segundo orden) y discute los diferentes tipos de respuestas (sin amortiguamiento, subamortiguada, críticamente amortiguada, sobreamortiguada).

Ejercicios prácticos sugeridos:

- Propón ejercicios donde los estudiantes deban identificar sistemas de primer y segundo orden a partir de datos experimentales o gráficos de respuesta en el tiempo.
- Incluye un ejercicio práctico en el que los estudiantes desarrollen un programa para modelar la respuesta de un sistema ante una entrada escalón y compararla con datos experimentales.

Explica el concepto de error en estado estacionario y cómo afecta el rendimiento de los sistemas de control. Usa la figura 10 (Errores en estado estacionario y coeficientes estáticos de error) para facilitar la comprensión.

Como cierre enfatiza la importancia de la identificación de sistemas en el diseño de controladores eficaces y cómo este proceso ayuda a comprender mejor el comportamiento dinámico de los sistemas. Asegúrate de que los estudiantes puedan identificar y calcular los parámetros característicos de sistemas de primer y segundo orden a partir de datos gráficos. Integra ejemplos industriales reales y estudios de caso para ilustrar cómo la identificación de sistemas se aplica en la práctica.

Tema 9

El objetivo de este tema es que los alumnos comprendan el concepto y la importancia de los sistemas estocásticos en la ingeniería de control, aprender el proceso de identificación estocástica y su aplicación en el modelado de sistemas con comportamiento incierto. De igual forma es importante que aprendan a dominar la técnica de mínimos cuadrados para la identificación paramétrica determinística de sistemas.

Explicar qué es un sistema estocástico, destacando la diferencia entre sistemas determinísticos y estocásticos. Usar ejemplos del mundo real para ilustrar cómo la incertidumbre y la variabilidad afectan el comportamiento de sistemas en ingeniería. Resaltar la importancia de la identificación estocástica para el desarrollo de modelos que capturen la incertidumbre inherente a estos sistemas.

Presentar la técnica de mínimos cuadrados, su historia y fundamento matemático. Explicar cómo este método permite identificar los parámetros de un modelo que mejor se ajusta a un conjunto de datos experimentales. Ilustrar el proceso con un ejemplo simple, como la regresión lineal, antes de pasar a ejemplos más complejos relacionados con la identificación de sistemas.

Proponer un ejercicio práctico donde los estudiantes apliquen la técnica de mínimos cuadrados para identificar un sistema de primer orden. Proporcionar datos de ejemplo y guiar a los estudiantes a través

de los pasos para formar la matriz de diseño, calcular la matriz de parámetros estimados y validar el modelo. Avanzar a un sistema de segundo orden, explicando las diferencias y la complejidad adicional. Animar a los estudiantes a reflexionar sobre cómo el ruido y las perturbaciones pueden afectar la precisión del modelo identificado.

Concluir con una discusión sobre la relevancia de los sistemas estocásticos y la identificación de sistemas en la ingeniería de control. Fomentar una reflexión sobre cómo estos conceptos se aplican en diversas áreas, como la inteligencia artificial y la optimización estocástica. Asegurarse de que los conceptos matemáticos y estadísticos fundamentales sean claros para todos los estudiantes antes de avanzar a temas más complejos. Utilizar software de cálculo numérico, como Python con NumPy, para demostrar ejemplos prácticos y ejercicios.

Tema 10

Comienza la sesión con una revisión rápida de los conceptos de funciones de transferencia continua y su importancia en el control de sistemas. Explica brevemente la necesidad de convertir estas funciones a su forma discreta para aplicaciones de control digital. Utiliza ejemplos visuales para ilustrar los planos s y z , enfatizando la importancia de la transformación de estas funciones para el diseño de controladores digitales.

Divide la sesión en tres partes, cada una dedicada a uno de los métodos de conversión: mapeo de polos y ceros, equivalente por retenedor de orden cero (ZOH), y el método de transformación de Tustin. Para cada método:

- Mapeo de polos y ceros: explica el concepto de mapeo y cómo se utiliza esta transformación para mover polos y ceros del plano s al plano z . Proporciona un ejemplo práctico, posiblemente utilizando la función de transferencia dada en el contenido del curso.
- Equivalente por Retenedor de Orden Cero (ZOH): discute cómo un ZOH afecta la conversión de la función de transferencia y cómo se puede obtener una $G(z)$ a partir de una $G(s)$ mediante este método. Utiliza ejercicios prácticos con Python, mostrando cómo utilizar la librería SciPy para realizar esta conversión.
- Método de Transformación de Tustin: explica la transformación bilineal y su importancia para mantener la estabilidad de los sistemas al convertir de continuo a discreto. Proporciona ejemplos de cómo realizar esta transformación, tanto manualmente como utilizando Python.

Ejercicios prácticos recomendados:

Para cada método propón ejercicios prácticos en los que los estudiantes puedan aplicar los conceptos aprendidos. Esto puede incluir la conversión de funciones de transferencia dadas, utilizando tanto cálculos manuales como implementaciones en Python. Asegúrate de revisar los resultados en clase y discutir cualquier dificultad que los estudiantes puedan encontrar.

Al final de la sesión, anima a los estudiantes a discutir las ventajas y desventajas de cada método. Puedes iniciar esta discusión presentando diferentes escenarios de control y preguntando qué método sería más apropiado y por qué.

Tema 11

Al concluir este tema se espera que los estudiantes tengan un entendimiento profundo sobre los controladores PID, su funcionamiento, cómo se componen, y cómo se sintonizan para optimizar el control de procesos en sistemas digitales.

Explicar la historia y la evolución de los controladores PID, destacando su importancia y prevalencia en la industria. Describir el propósito y la estructura general de un controlador PID, incluyendo sus componentes: Desglose de Componentes PID.

- Acción Proporcional (P): conceptualizar la acción proporcional y su efecto en el sistema de control. Mostrar mediante ejercicios en Python cómo varía la respuesta del sistema al ajustar la ganancia proporcional K_c .
- Acción Integral (I): explicar la necesidad de la acción integral para eliminar el error en estado estacionario. Utilizar Python para demostrar el impacto de diferentes valores de T_i en la respuesta del sistema.
- Acción Derivativa (D): discutir el papel de la acción derivativa en predecir y corregir el comportamiento futuro del error. Abordar las limitaciones y consideraciones al utilizar la acción derivativa.
- Combinación de Acciones para Formar el PID: explicar cómo las acciones P, I, y D trabajan juntas para mejorar el rendimiento del sistema. Presentar ejemplos en Python para ilustrar la respuesta del sistema bajo control PID frente a las acciones P, I, y PI por separado.

Detallar el procedimiento y las fórmulas para aplicar el método de sintonización de Ziegler-Nichols. Proporciona un ejemplo práctico usando Python. Realiza un procedimiento similar para el método de Cohen-Coon. No olvides explicar cómo y cuándo utilizar este método y sus mejoras con respecto al de

Ziegler-Nichols. Presenta un ejemplo práctico ajustando los parámetros de un PID para un sistema específico. Discute la transición de controladores PID de tiempo continuo a digital, enfocándose en la discretización y el método de Tustin.

Antes de finalizar subraya la importancia de la sintonización adecuada de los controladores PID para optimizar el rendimiento de los sistemas de control. Motiva a los estudiantes a experimentar con los parámetros de PID en diferentes escenarios para comprender mejor su impacto.

Tema 12

En este tema se espera que los estudiantes logren comprender el propósito y la funcionalidad de los controladores digitales. Además, deben ser capaces de identificar los diferentes tipos de controladores digitales, sus aplicaciones y su modo de implementación.

Explica el objetivo de llevar la variable de proceso a un valor deseado mediante un controlador, enfatizando la importancia de la adaptabilidad y mejora continua en los controladores digitales. No olvides describir los componentes básicos de un lazo de control univariable y su interacción.

Al abordar el subtema sobre las técnicas de control moderno considera que:

- **Control adaptable y no lineal:** discutir cómo estas técnicas permiten a los sistemas adaptarse a cambios y manejar dinámicas complejas.
- **Control difuso y óptimo:** ofrecer ejemplos de aplicaciones reales donde estos controles ofrecen ventajas significativas.
- **Control por redes neuronales:** explicar la relación entre inteligencia artificial y control digital, con ejemplos de modelado e identificación de sistemas.

Ejercicios prácticos sugeridos:

Proponer un caso de estudio para diseñar un esquema de control adaptativo o difuso para un proceso seleccionado, fomentando la discusión y el análisis crítico.

Exponer con detalles el controlador de un paso, Dahlin y Kalman, explicando su funcionamiento y casos de uso. Discute su proceso de diseño y sintonización, resaltando las diferencias con los controladores convencionales. Explicar las causas del efecto timbre y cómo se puede mitigar este efecto en controladores con acción integral. Detallar la técnica de cancelación de polos y ceros, junto a sus implicaciones en la estabilidad y respuesta del sistema.

Ejercicios prácticos sugeridos:

- Guiar a los estudiantes en el diseño de un controlador discreto utilizando cancelación de polos y ceros, basándose en un ejemplo práctico.

Como cierre de la sesión puedes considerar realizar una reflexión sobre cómo las técnicas avanzadas de control pueden abordar desafíos complejos en diversos campos.

Tema 13

Al finalizar este tema los estudiantes deben tener una comprensión sólida de las variables de estado en sistemas discretos, incluyendo su definición, representación, y aplicaciones en el análisis y diseño de sistemas de control digital.

Comienza con una revisión de los sistemas de control clásicos, destacando sus limitaciones al tratar con sistemas complejos multivariables, no lineales o variantes en el tiempo. Introduce el concepto de variables de estado como una herramienta poderosa para superar estas limitaciones, mencionando su origen histórico y su importancia en el control moderno.

Explica detalladamente qué son las variables de estado y cómo se utilizan para representar sistemas dinámicos en forma matricial. Utiliza ejemplos sencillos para ilustrar cómo se pueden identificar y definir las variables de estado a partir de ecuaciones diferenciales o ecuaciones de diferencias. Propón ejercicios de modelado en los que los estudiantes construyan modelos en espacio de estados a partir de descripciones de sistemas o funciones de transferencia.

Explica cómo analizar la estabilidad de sistemas utilizando la representación en espacio de estados, incluyendo el concepto de eigenvalores. Realiza ejercicios prácticos para calcular los eigenvalores de matrices de estado y determinar la estabilidad de sistemas. Discute el proceso de discretización de sistemas continuos y cómo se obtienen las matrices de estado discretas. Realiza una actividad práctica donde los estudiantes conviertan un sistema continuo en su equivalente discreto utilizando software especializado.

Como recomendaciones generales asegúrate de que todos los estudiantes comprendan la importancia de las variables de estado en el diseño de sistemas de control modernos y promueve la participación mediante preguntas dirigidas y discusiones en clase para reforzar la comprensión teórica con aplicaciones prácticas.

Tema 14

Como finalidad de este tema se espera que los estudiantes comprendan los conceptos de controlabilidad y observabilidad en sistemas dinámicos discretos, apliquen los criterios para evaluar el estado de estos parámetros y conozcan el método de Ackermann para el diseño de reguladores por retroalimentación de estados.

Comienza con definiciones claras y sencillas de controlabilidad y observabilidad. Utiliza analogías o ejemplos de la vida cotidiana para ilustrar cómo podemos "controlar" o "observar" sistemas. Destaca por qué estos conceptos son fundamentales para el diseño de sistemas de control eficaces y para asegurar que podemos alcanzar estados deseados y conocer el estado actual de un sistema.

Revisa la formulación matemática de la matriz de controlabilidad y explica la condición de que el sistema es controlable si el rango de W_c es igual al número de estados n .

Ejercicios prácticos sugeridos:

- Realiza un ejercicio en clase donde los estudiantes calculen la matriz de controlabilidad para un sistema dado. Puedes usar el ejemplo proporcionado en el contenido del curso.
- Muestra cómo utilizar Python para calcular la matriz de controlabilidad y su determinante, enfatizando la interpretación de los resultados.

Explica cómo la matriz de observabilidad se utiliza para determinar si es posible conocer el estado completo de un sistema a partir de sus salidas.

Ejercicios prácticos sugeridos:

- Propón un ejercicio donde los estudiantes formen la matriz de observabilidad y verifiquen su rango.
- Demuestra el uso de Python para calcular la matriz de observabilidad y su rango, facilitando la comprensión práctica del concepto.

Introduce el concepto de reguladores por retroalimentación de estados y la importancia de la selección de ganancias K para la colocación de polos. Explica el método de Ackermann paso a paso, asegurándote de que los estudiantes comprendan cómo se aplica para obtener la ganancia K .

Ejercicios prácticos sugeridos:

- Realiza un ejercicio de diseño de un regulador usando el método de Ackermann, destacando cómo se pueden cumplir especificaciones de diseño como el tiempo de asentamiento y el coeficiente de amortiguamiento.

Concluye con una discusión sobre cómo la controlabilidad y la observabilidad son fundamentales para el diseño efectivo de controladores y la importancia de la retroalimentación de estados en la ingeniería de control moderna. Propón algunas preguntas para reflexionar o discutir en grupos pequeños, enfocándose en la aplicación de estos conceptos en sistemas reales.

Tema 15

El objetivo de este tema es introducir a los estudiantes a las técnicas de control multivariable, enfocándose en la función de transferencia de sistemas MIMO y el modelado de sistemas con múltiples entradas y salidas. Se espera que al finalizar la clase comprendan la diversidad y aplicabilidad de estos sistemas en la ingeniería de control moderna.

No olvides enfatizar en la relevancia del control multivariable en la modelación y control de sistemas complejos, como los vehículos o procesos industriales, donde varias variables interactúan simultáneamente.

Utilizar diagramas para explicar la estructura de un sistema MIMO, incluyendo conexiones de sistemas SISO en configuraciones verticales y horizontales.

Ejercicios prácticos sugeridos:

- Presentar un sistema MIMO 2×2 y discutir las funciones de transferencia involucradas para ilustrar la interacción entre entradas y salidas.
- Realizar un ejercicio en clase donde los estudiantes calculen las ganancias relativas de un sistema MIMO dado, aplicando los pasos propuestos por Ogata (1996).

Describir la transición de la teoría de control clásico a la representación en variables de estado para sistemas MIMO, utilizando álgebra matricial.

Ejercicios prácticos sugeridos:

- Guiar a los estudiantes a través de un ejemplo donde transformen un sistema dado a su forma canónica diagonal, facilitando el entendimiento de esta representación.

Explorar los desafíos de acoplamiento en sistemas MIMO y cómo los esquemas de desacoplamiento pueden mitigar estas interacciones. Presentar diferentes casos de ganancia relativa y discutir las estrategias de desacoplamiento aplicables, promoviendo la participación estudiantil mediante preguntas y respuestas.

Resalta la importancia y el impacto del control multivariable en la ingeniería de control, discutiendo aplicaciones reales como sistemas de seguridad activa en vehículos y control de procesos industriales.

Verificar la comprensión de los estudiantes mediante preguntas de revisión que cubran los principales conceptos y técnicas introducidas.



Evidencia

A continuación, se presentan las evidencias del curso con su respectiva rubrica de evaluación.

Evidencia 1

Modelo matemático de un sistema discreto en aplicaciones básicas de robótica industrial.

Los sistemas continuos procesan señales de manera ininterrumpida, sin embargo, los sistemas discretos manejan datos en momentos específicos. Esto es especialmente relevante en la robótica, donde los movimientos y decisiones se calculan en intervalos de tiempo discretos para lograr precisión y control.

Como evidencia de tus conocimientos de este módulo, se te solicita contestar los siguientes puntos:

1. Realiza una pequeña investigación en fuentes confiables y define con tus palabras que es un Sistema Discreto. Complementa tu respuesta con ejemplos de la vida real.
2. Considera un brazo robótico utilizado en líneas de ensamblaje y describe los elementos que pueden conformar los componentes un sistema discreto. Por ejemplo: las variables de entrada incluyen señales de sensores como la posición, la orientación y la carga, mientras que las variables de salida son los movimientos precisos del brazo en respuesta a estas entradas.
3. Utilizando Python y Matplotlib, grafica cómo varía la posición del brazo robótico con el tiempo, mostrando una secuencia de movimientos discretos.
4. Obtén la función discreta que modela el comportamiento del brazo robótico, representando cómo cambia la posición del brazo en cada instante. Encuentra la transformada Z de esa ecuación que nos permite analizar el sistema en el dominio de la frecuencia.
5. Encuentra la función de transferencia del brazo robótico para entender cómo las entradas afectan las salidas en términos de frecuencia y tiempo. Esta etapa es clave para diseñar controladores que mejoren la eficiencia y precisión del brazo. Realiza este punto utilizando Python.

Realiza la entrega de tu evidencia con base en los criterios de evaluación que se muestran en la siguiente rúbrica.

Criterios de evaluación	Nivel de desempeño			%
	Altamente competente 100%-86%	Competente 85%-70%	Aún sin desarrollar la competencia 69%-0%	
1. Definición y comprensión de sistemas discretos.	15 a 13 pts.	13 a 9 pts.	9 a 0 pts.	15
	Define claramente un sistema discreto y explica con ejemplos su aplicación en campos como la robótica y la automatización.	Define un sistema discreto con algunos detalles menores faltantes o imprecisiones leves.	La definición de sistema discreto es incompleta o contiene errores conceptuales.	
2. Análisis y descripción de los componentes del sistema discreto del brazo robótico.	20 a 18 pts.	18 a 14 pts.	14 a 0 pts.	20
	Proporciona un análisis detallado y relevante, con una explicación clara de las variables de entrada y salida.	El análisis es adecuado, pero le faltan detalles en la explicación de las variables.	El análisis proporcionado es demasiado general o no está directamente relacionado con sistemas discretos.	
3. Representación gráfica en Python.	20 a 18 pts.	18 a 14 pts.	14 a 0 pts.	20
	Crea una representación gráfica precisa y relevante del comportamiento del sistema discreto.	La gráfica es correcta, pero falta claridad o detalles en la representación.	La gráfica es incorrecta o no representa adecuadamente el comportamiento del sistema.	
4. Ecuación en el dominio del tiempo y transformada Z.	25 a 22 pts.	22 a 17 pts.	17 a 0 pts.	25
	Presenta y explica correctamente una ecuación en el dominio del tiempo y su transformada Z.	La ecuación y la transformada Z son correctas, pero la explicación tiene algunas imprecisiones.	La ecuación o la transformada Z contiene errores significativos.	
5. Función de transferencia en Python.	20 a 18 pts.	18 a 14 pts.	14 a 0 pts.	20
	Calcula y explica de manera precisa la función de transferencia del sistema discreto.	El cálculo es correcto, pero la explicación es incompleta o contiene pequeños errores.	Errores significativos en el cálculo o en la explicación de la función de transferencia.	
TOTAL				100%

Evidencia 2

Desarrollo del modelo matemático de un sistema discreto la técnica de mínimos cuadrados.

Para la realización de la evidencia realiza las siguientes actividades:

1. Encuentra un conjunto de datos reales que incluyan al menos un evento discreto (estadísticas de un equipo deportivo, graduados por semestre de una universidad, transacciones financieras mensuales, entre otros).
 - a. Clasifica las variables del evento en una variable de entrada y una de salida.
 - b. Representa gráficamente estos datos en Python utilizando la biblioteca matplotlib.
2. Aplica la técnica de mínimos cuadrados en Python para obtener una ecuación de diferencias que modele el evento discreto. Utiliza una de las siguientes estructuras:

$$y[n] = iy[n - 1] + jx[n] + e[n]$$

$$y[n] = i_1y[n - 1] + i_2y[n - 2] + j_1x[n - 1] + j_2x[n - 2] + e[n]$$

- a. Grafica la ecuación de diferencias con matplotlib y compárala con los datos originales.
3. Obtén la función de transferencia $G(z)$ del sistema a partir de la ecuación de diferencias. Utilizando Python y la biblioteca scipy, calcula la respuesta del sistema a una entrada de escalón unitario.
4. Analiza la estabilidad del sistema al implementar un controlador proporcional.
 - a. Realiza simulaciones en Python con diferentes valores de K , incluyendo uno en el rango estable y otro fuera, observa la respuesta del sistema a una entrada de escalón.
5. Elabora un informe con el resultado de los pasos anteriores, no olvides agregar una pequeña conclusión sobre tu aprendizaje.

Realiza la entrega de tu evidencia con base en los criterios de evaluación que se muestran en la siguiente rúbrica.

Criterios de evaluación	Nivel de desempeño			%
	Altamente competente 100%-86%	Competente 85%-70%	Aún sin desarrollar la competencia 69%-0%	
1. Selección y representación gráfica de datos.	15 a 13 pts.	13 a 9 pts.	9 a 0 pts.	15
	El alumno identifica y clasifica correctamente las variables de entrada y salida y representa los datos de manera clara y precisa utilizando Python y matplotlib.	El alumno clasifica las variables y representa los datos con pequeños errores de precisión o claridad en Python y matplotlib.	El alumno tiene dificultades para clasificar las variables y su representación gráfica es inadecuada o incorrecta.	
2. Modelado matemático del sistema.	20 a 18 pts.	18 a 14 pts.	14 a 0 pts.	20
	El alumno aplica correctamente la técnica de mínimos cuadrados y desarrolla una ecuación de diferencias precisa que refleja el evento discreto, comparando adecuadamente con los datos originales.	El alumno aplica la técnica de mínimos cuadrados con pequeños errores y la ecuación de diferencias tiene imprecisiones leves. La comparación con los datos originales es adecuada.	El alumno aplica incorrectamente la técnica de mínimos cuadrados y la ecuación de diferencias no refleja el evento discreto. La comparación es inadecuada.	
3. Función de transferencia y respuesta del sistema.	15 a 13 pts.	13 a 9 pts.	9 a 0 pts.	15
	El alumno deriva e interpreta correctamente la función de transferencia $G(z)$ y calcula adecuadamente la respuesta del sistema ante un escalón unitario usando Python y SciPy.	La función de transferencia $G(z)$ y la respuesta del sistema ante un escalón unitario están correctamente calculadas, pero con pequeñas imprecisiones en la interpretación.	La función de transferencia $G(z)$ es incorrecta y la respuesta del sistema no se calcula adecuadamente o tiene errores significativos.	
4. Análisis de estabilidad y simulación de controlador.	15 a 13 pts.	13 a 9 pts.	9 a 0 pts.	15
	El alumno analiza correctamente la estabilidad del sistema y realiza simulaciones precisas con diferentes valores de K , interpretando adecuadamente la respuesta del sistema.	El análisis de estabilidad y las simulaciones con diferentes valores de K son correctas, pero con algunas imprecisiones en la interpretación de la respuesta del sistema.	El análisis de estabilidad es incorrecto y las simulaciones no reflejan la respuesta del sistema o son erróneas.	
5. Elaboración del informe.	35 a 32 pts.	32 a 28 pts.	28 a 0 pts.	35
	El informe está completo y bien estructurado, incluye todas las	El informe está completo, pero con una estructura o presentación que puede	El informe es incompleto, carece de estructura o claridad, no incluye	

	gráficas y análisis realizados, y presenta conclusiones claras y coherentes sobre el aprendizaje.	mejorar; incluye la mayoría de los análisis y gráficas, con conclusiones adecuadas.	todos los análisis y gráficas necesarios, y las conclusiones son vagas o incorrectas.	
TOTAL				100%

Evidencia 3

Controlador PID sintonizado mediante el método de Ziegler-Nichols para un motor de corriente directa.

Según Ogata (2003) y Fernández del Busto y Ezeta (2013), la función de transferencia de un motor de corriente directa relaciona el voltaje aplicado a la armadura $u(t)$ con la posición de la flecha $y(t)$ puede aproximarse a:

$$G(s) = \frac{0.648}{s(0.13s+1)}$$

Y su representación en variables de estado continuo es la siguiente:

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -\frac{1}{0.13} \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{0.648}{0.13} \end{bmatrix} u(t)$$

$$y(t) = [1 \quad 0]x(t)$$

Como evidencia de tus conocimientos de este módulo, se te solicita contestar los siguientes puntos:

1. Diseñar un controlador PID sintonizado mediante el método de Ziegler-Nichols. Obtén las gráficas de la respuesta del sistema al escalón unitario, antes y después de uso del controlador. Obtén la versión discreta del controlador PID.
2. Obtén la versión discreta de la representación en variables de estado continuo dada.
3. Proporciona la función de transferencia del sistema (ya discretizado) y comprueba tu respuesta con la función `ss2tf()`.
4. Determina el polinomio $P(z)$ y encuentra sus raíces. ¿El sistema es estable?
5. Determina si el sistema (ya discretizado) es observable y controlable. Presenta las matrices W_o y W_c respectivamente.

Realiza la entrega de tu evidencia con base en los criterios de evaluación que se muestran en la siguiente rúbrica.

Criterios de evaluación	Nivel de desempeño			%
	Altamente competente 100%-86%	Competente 85%-70%	Aún sin desarrollar la competencia 69%-0%	
1. Diseño de un controlador PID y respuesta del sistema.	20 a 18 pts. Diseña un controlador PID utilizando el método de Ziegler-Nichols de forma adecuada. Muestra gráficas detalladas de la respuesta antes y después de aplicar el controlador, evidenciando un entendimiento profundo de la teoría y práctica.	18 a 14 pts. Diseña un controlador PID con el método de Ziegler-Nichols correctamente. Presenta gráficas de la respuesta del sistema que demuestran comprensión adecuada del control PID.	14 a 0 pts. Diseño del controlador PID incompleto o incorrecto. Gráficas de respuesta del sistema inadecuadas o ausentes, indicando falta de comprensión.	20
2. Discretización del sistema y controlador.	20 a 18 pts. Realiza una discretización precisa del sistema y del controlador PID, mostrando claramente la transición de la representación continua a la discreta con justificación teórica.	18 a 14 pts. Discretización del sistema y del controlador PID realizada con algunos errores menores, la transición de lo continuo a discreto es adecuada, pero con justificaciones limitadas.	14 a 0 pts. Discretización incorrecta o no justificada del sistema y controlador PID, con poca o ninguna comprensión de la representación discreta.	20
3. Función de transferencia y comprobación con ss2tf.	15 a 13 pts. Proporciona una función de transferencia del sistema discretizado correcta y la comprueba eficazmente con la herramienta ss2tf(), demostrando alta capacidad analítica.	13 a 9 pts. La función de transferencia es correcta, pero la comprobación con ss2tf() presenta algunas imprecisiones. Muestra competencia en el análisis.	9 a 0 pts. Función de transferencia incorrecta y comprobación con ss2tf() no realizada o errónea, mostrando falta de comprensión analítica.	15
4. Polinomio de la ecuación característica y análisis de estabilidad.	20 a 18 pts. Determina el polinomio característico de forma exacta, encuentra sus raíces y realiza un análisis de estabilidad completo y bien fundamentado.	18 a 14 pts. Calcula el polinomio característico y sus raíces con pequeños errores; el análisis de estabilidad es aceptable pero no está bien fundamentado.	14 a 0 pts. No determina el polinomio característico de manera correcta y el análisis de estabilidad es deficiente o inexistente.	20
5. Observabilidad y controlabilidad del sistema discretizado.	25 a 22 pts. Demuestra correctamente si el sistema discretizado es o no observable y controlable, presentando matrices W_o y W_c correctamente.	22 a 17 pts. Demuestra correctamente si el sistema discretizado es o no observable o controlable, pero las matrices W_o y W_c presentan errores menores en su definición.	17 a 0 pts. No demuestra correctamente la observabilidad ni la controlabilidad del sistema discretizado. Las matrices W_o y W_c son incorrectas o no están presentes.	25
TOTAL				100%



Bibliografía y recursos especiales

- Fernández del Busto y Ezeta, R. (2013). *Análisis y diseño de sistemas de control digital*. México: McGraw-Hill.
- Fadali, M., y Visioli, A. (2019). *Digital Control Engineering: Analysis and Design*. Estados Unidos: Academic Press.
- Golnaraghi, F., y Kuo, B. (2017). *Automatic Control Systems* (10th ed.). Estados Unidos: McGraw- Hill Professional.
- Nise, N. (2019). *Control Systems Engineering* (8th ed.). Estados Unidos: John Wiley & Sons.
- Pelgrom, M. (2022). *Analog-to-Digital conversion*. Estados Unidos: Springer.
- Unsalan, C., Barkana, D., y Gurhan, H. (2021). *Embedded Digital Control with Microcontrollers: Implementation with C and Python*. Estados Unidos: John Wiley & Sons.



Tips importantes