



Pontificia Universidad  
**JAVERIANA**  
Colombia

# Pontificia Universidad Javeriana

Facultad de Ingeniería

Departamento de Electrónica

## Control de Sistemas Clase 1: Introducción

Gerardo Becerra, Ph.D.

[gbecerra@javeriana.edu.co](mailto:gbecerra@javeriana.edu.co)

Enero 21, 2020

# Presentación del Curso

---

# Descripción General del Curso

---

- El curso está dedicado al diseño e implementación de sistemas de control de entrada sencilla - salida sencilla mediante sistemas digitales.

# Descripción General del Curso

---

- El curso está dedicado al diseño e implementación de sistemas de control de entrada sencilla - salida sencilla mediante sistemas digitales.
- Se estudian procedimientos de análisis y diseño de controladores en el dominio del tiempo y la frecuencia.

# Descripción General del Curso

---

- El curso está dedicado al diseño e implementación de sistemas de control de entrada sencilla - salida sencilla mediante sistemas digitales.
- Se estudian procedimientos de análisis y diseño de controladores en el dominio del tiempo y la frecuencia.
- Se desarrollan proyectos en los que se implementan sistemas de control mediante:

# Descripción General del Curso

---

- El curso está dedicado al diseño e implementación de sistemas de control de entrada sencilla - salida sencilla mediante sistemas digitales.
- Se estudian procedimientos de análisis y diseño de controladores en el dominio del tiempo y la frecuencia.
- Se desarrollan proyectos en los que se implementan sistemas de control mediante:
  - Construcción de modelos

# Descripción General del Curso

---

- El curso está dedicado al diseño e implementación de sistemas de control de entrada sencilla - salida sencilla mediante sistemas digitales.
- Se estudian procedimientos de análisis y diseño de controladores en el dominio del tiempo y la frecuencia.
- Se desarrollan proyectos en los que se implementan sistemas de control mediante:
  - Construcción de modelos
  - Diseño de la estrategia de control

# Descripción General del Curso

---

- El curso está dedicado al diseño e implementación de sistemas de control de entrada sencilla - salida sencilla mediante sistemas digitales.
- Se estudian procedimientos de análisis y diseño de controladores en el dominio del tiempo y la frecuencia.
- Se desarrollan proyectos en los que se implementan sistemas de control mediante:
  - Construcción de modelos
  - Diseño de la estrategia de control
  - Implementación de la solución



# Descripción General del Curso

---

- El curso está dedicado al diseño e implementación de sistemas de control de entrada sencilla - salida sencilla mediante sistemas digitales.
- Se estudian procedimientos de análisis y diseño de controladores en el dominio del tiempo y la frecuencia.
- Se desarrollan proyectos en los que se implementan sistemas de control mediante:
  - Construcción de modelos
  - Diseño de la estrategia de control
  - Implementación de la solución
  - Validación de la solución.

- Asignación de lecturas para estudio individual anterior y posterior a la clase.

# Estrategias Pedagógicas del Curso

---

- Asignación de lecturas para estudio individual anterior y posterior a la clase.
- Exposiciones teóricas por parte del profesor (sesiones teóricas).

# Estrategias Pedagógicas del Curso

---

- Asignación de lecturas para estudio individual anterior y posterior a la clase.
- Exposiciones teóricas por parte del profesor (sesiones teóricas).
- Desarrollo de proyectos de aplicación (sesiones prácticas).

- Asignación de lecturas para estudio individual anterior y posterior a la clase.
- Exposiciones teóricas por parte del profesor (sesiones teóricas).
- Desarrollo de proyectos de aplicación (sesiones prácticas).
- Uso de herramientas de simulación y diseño de controladores.

## Actividades de Evaluación del Curso

Componente	Fecha	Valor
Examen parcial	Semana 8	25%
Proyecto control PID	Semana 13	20%
Proyecto control espacio de estados	Semana 18	20%
Examen final	Semana 16	25%
Tareas	Permanente	10%

1. Capítulo 1: Fundamentos de sistemas de control

1. Capítulo 1: Fundamentos de sistemas de control
  - 1.1 Elementos de un lazo de control



# Contenidos Generales del Curso

---

1. Capítulo 1: Fundamentos de sistemas de control
  - 1.1 Elementos de un lazo de control
  - 1.2 Modelos de sistemas dinámicos

# Contenidos Generales del Curso

---

1. Capítulo 1: Fundamentos de sistemas de control
  - 1.1 Elementos de un lazo de control
  - 1.2 Modelos de sistemas dinámicos
    - Ecuaciones diferenciales

# Contenidos Generales del Curso

---

## 1. Capítulo 1: Fundamentos de sistemas de control

### 1.1 Elementos de un lazo de control

### 1.2 Modelos de sistemas dinámicos

- Ecuaciones diferenciales
- Funciones de transferencia

# Contenidos Generales del Curso

---

## 1. Capítulo 1: Fundamentos de sistemas de control

### 1.1 Elementos de un lazo de control

### 1.2 Modelos de sistemas dinámicos

- Ecuaciones diferenciales
- Funciones de transferencia
- Espacio de estados

# Contenidos Generales del Curso

---

## 1. Capítulo 1: Fundamentos de sistemas de control

### 1.1 Elementos de un lazo de control

### 1.2 Modelos de sistemas dinámicos

- Ecuaciones diferenciales
- Funciones de transferencia
- Espacio de estados

### 1.3 Especificaciones de desempeño

# Contenidos Generales del Curso

---

1. Capítulo 1: Fundamentos de sistemas de control
  - 1.1 Elementos de un lazo de control
  - 1.2 Modelos de sistemas dinámicos
    - Ecuaciones diferenciales
    - Funciones de transferencia
    - Espacio de estados
  - 1.3 Especificaciones de desempeño
  - 1.4 Controlador proporcional - integral - derivativo (PID)

# Contenidos Generales del Curso

---

1. Capítulo 1: Fundamentos de sistemas de control
  - 1.1 Elementos de un lazo de control
  - 1.2 Modelos de sistemas dinámicos
    - Ecuaciones diferenciales
    - Funciones de transferencia
    - Espacio de estados
  - 1.3 Especificaciones de desempeño
  - 1.4 Controlador proporcional - integral - derivativo (PID)
2. Capítulo 2: Diseño de controladores clásicos

# Contenidos Generales del Curso

---

1. Capítulo 1: Fundamentos de sistemas de control
  - 1.1 Elementos de un lazo de control
  - 1.2 Modelos de sistemas dinámicos
    - Ecuaciones diferenciales
    - Funciones de transferencia
    - Espacio de estados
  - 1.3 Especificaciones de desempeño
  - 1.4 Controlador proporcional - integral - derivativo (PID)
2. Capítulo 2: Diseño de controladores clásicos
  - 2.1 Metodología de diseño de sistemas de control



# Contenidos Generales del Curso

---

1. Capítulo 1: Fundamentos de sistemas de control
  - 1.1 Elementos de un lazo de control
  - 1.2 Modelos de sistemas dinámicos
    - Ecuaciones diferenciales
    - Funciones de transferencia
    - Espacio de estados
  - 1.3 Especificaciones de desempeño
  - 1.4 Controlador proporcional - integral - derivativo (PID)
2. Capítulo 2: Diseño de controladores clásicos
  - 2.1 Metodología de diseño de sistemas de control
  - 2.2 Método por lugar de las raíces

### 3. Capítulo 3: Implementación digital de controladores

## 3. Capítulo 3: Implementación digital de controladores

### 3.1 Acondicionamiento de señal

## 3. Capítulo 3: Implementación digital de controladores

3.1 Acondicionamiento de señal

3.2 Métodos de discretización

## 3. Capítulo 3: Implementación digital de controladores

3.1 Acondicionamiento de señal

3.2 Métodos de discretización

3.3 Soluciones micro-controladas

## 3. Capítulo 3: Implementación digital de controladores

- 3.1 Acondicionamiento de señal
- 3.2 Métodos de discretización
- 3.3 Soluciones micro-controladas
- 3.4 Manejo de actuadores - PWM

# Contenidos Generales del Curso (cont)

---

## 3. Capítulo 3: Implementación digital de controladores

3.1 Acondicionamiento de señal

3.2 Métodos de discretización

3.3 Soluciones micro-controladas

3.4 Manejo de actuadores - PWM

## 4. Capítulo 4: Control por variables de estado

# Contenidos Generales del Curso (cont)

---

## 3. Capítulo 3: Implementación digital de controladores

3.1 Acondicionamiento de señal

3.2 Métodos de discretización

3.3 Soluciones micro-controladas

3.4 Manejo de actuadores - PWM

## 4. Capítulo 4: Control por variables de estado

4.1 Ubicación de polos



# Contenidos Generales del Curso (cont)

---

## 3. Capítulo 3: Implementación digital de controladores

3.1 Acondicionamiento de señal

3.2 Métodos de discretización

3.3 Soluciones micro-controladas

3.4 Manejo de actuadores - PWM

## 4. Capítulo 4: Control por variables de estado

4.1 Ubicación de polos

4.2 Observadores de estado

# Contenidos Generales del Curso (cont)

---

## 3. Capítulo 3: Implementación digital de controladores

- 3.1 Acondicionamiento de señal
- 3.2 Métodos de discretización
- 3.3 Soluciones micro-controladas
- 3.4 Manejo de actuadores - PWM

## 4. Capítulo 4: Control por variables de estado

- 4.1 Ubicación de polos
- 4.2 Observadores de estado
- 4.3 Controlabilidad - observabilidad

# Contenidos Generales del Curso (cont)

---

## 3. Capítulo 3: Implementación digital de controladores

- 3.1 Acondicionamiento de señal
- 3.2 Métodos de discretización
- 3.3 Soluciones micro-controladas
- 3.4 Manejo de actuadores - PWM

## 4. Capítulo 4: Control por variables de estado

- 4.1 Ubicación de polos
- 4.2 Observadores de estado
- 4.3 Controlabilidad - observabilidad
- 4.4 Ubicación de polos

# Contenidos Generales del Curso (cont)

---

## 3. Capítulo 3: Implementación digital de controladores

- 3.1 Acondicionamiento de señal
- 3.2 Métodos de discretización
- 3.3 Soluciones micro-controladas
- 3.4 Manejo de actuadores - PWM

## 4. Capítulo 4: Control por variables de estado

- 4.1 Ubicación de polos
- 4.2 Observadores de estado
- 4.3 Controlabilidad - observabilidad
- 4.4 Ubicación de polos
- 4.5 Observadores de estado

# Contenidos Detallados del Curso

Semana	Tema
Semana 1.	(Teoría) Introducción al curso - Fundamentos de sistemas de control
Semana 2.	(Teoría) Modelos de Sistemas Dinámicos (Ec. Diferenciales, Función Transferencia, Espacio de Estados, 1er/2do orden, tipos de entrada, respuestas)
Semana 3.	(Teoría) Diagramas de bloque en lazo cerrado (Práctica) P1: Modelado de Sistemas Dinámico usando Matlab/Simulink (Grupo 1)
Semana 4.	(Teoría) Estabilidad de sistemas realimentados - LGR (Práctica) P1: Modelado de Sistemas Dinámico usando Matlab/Simulink (Grupo 2)
Semana 5.	(Teoría) Especificaciones de desempeño (Práctica) P2: Microcontroladores, PWM, ADC (Grupo 1)
Semana 6.	(Teoría) Controlador PID (on/off, P, PI, PD, PID) (Práctica) P2: Microcontroladores, PWM, ADC (Grupo 2)
Semana 7.	(Teoría) Técnicas de Sintonización
<b>Semana 8.</b>	<b>Taller Pre-parcial</b> <b>Examen Parcial</b>
Semana 9.	(Teoría) Lugar Geométrico de las raíces - LGR (Práctica) P3: Identificación modelo de motor DC con encoder (Grupo 1)
Semana 10.	(Teoría) Compensadores por LGR (adelanto, atraso, adelanto-atraso) (Práctica) P3: Identificación modelo de motor DC con encoder (Grupo 2)
Semana 11.	(Teoría) Introducción al control digital (Práctica) P4: Control de velocidad de un motor DC desde Simulink (Grupo 1)
Semana 12.	(Teoría) Implementación digital de controladores (ZoH, PID digital, Ecuación en diferencias) (Práctica) P4: Control de velocidad de un motor DC desde Simulink (Grupo 2)
Semana 13.	(Teoría) Modelos en variables de estado (Práctica) P5: Control digital de velocidad de un motor DC desde Arduino (Grupo 1)
Semana 14.	(Teoría) Linealización de modelos dinámicos (variables de estado) (Práctica) P5: Control digital de velocidad de un motor DC desde Arduino (Grupo 2)
Semana 15.	(Teoría) Control por variables de estado
<b>Semana 16.</b>	<b>Taller Pre-parcial</b> <b>Examen Final</b>
Semana 17.	(Práctica) P6: Control por realimentación de estados para un péndulo invertido -Simulink (Grupo 1)
Semana 18.	(Práctica) P6: Control por realimentación de estados para un péndulo invertido -Simulink (Grupo 2)

## Bibliografía del Curso

---

- Dorf, R. C., Bishop, (2011). Sistemas de control moderno. Pearson Prentice Hall.
- Golnaraghi, F., & Kuo, B. C. (2010). Automatic control systems. Wiley.
- Franklin, G. F., Powell, J. D., & Workman, M. L. (2006). Digital control of dynamic systems. Menlo Park: Addison-wesley.

# Declaración de los Reglamentos

---

## Informes de las prácticas:

- Los informes serán entregados después de la práctica, según fecha y formato acordados.

# Declaración de los Reglamentos

---

## Informes de las prácticas:

- Los informes serán entregados después de la práctica, según fecha y formato acordados.
- Los grupos que no entreguen el informe dentro del plazo respectivo obtendrán una nota de 0,0.



# Declaración de los Reglamentos

---

## Informes de las prácticas:

- Los informes serán entregados después de la práctica, según fecha y formato acordados.
- Los grupos que no entreguen el informe dentro del plazo respectivo obtendrán una nota de 0,0.
- Los informes deben realizarse con la información obtenida por el grupo en el desarrollo del laboratorio. No se deben utilizar datos de otros grupos. En caso que así suceda, la nota que se pondrá a los grupos que hayan utilizado los mismos datos será de 0,0 en el informe y el caso será reportado a la Dirección de Carrera para proceder de acuerdo a lo estipulado en el reglamento de estudiantes de la universidad.

# Declaración de los Reglamentos

---

## Evaluaciones escritas:

- Objetos permitidos: lápiz, lapicero, minas, portaminas, borrador, calculadora (previa autorización del profesor).

# Declaración de los Reglamentos

---

## Evaluaciones escritas:

- Objetos permitidos: lápiz, lapicero, minas, portaminas, borrador, calculadora (previa autorización del profesor).
- Todo objeto diferente a los permitidos se considerará material no autorizado y deberá permanecer guardado en los morrales.

# Declaración de los Reglamentos

---

## Evaluaciones escritas:

- Objetos permitidos: lápiz, lapicero, minas, portaminas, borrador, calculadora (previa autorización del profesor).
- Todo objeto diferente a los permitidos se considerará material no autorizado y deberá permanecer guardado en los morrales.
- Objetos prohibidos: Teléfonos celulares, relojes inteligentes, apuntes, cuadernos, hojas, libros.

# Declaración de los Reglamentos

---

## Evaluaciones escritas:

- Objetos permitidos: lápiz, lapicero, minas, portaminas, borrador, calculadora (previa autorización del profesor).
- Todo objeto diferente a los permitidos se considerará material no autorizado y deberá permanecer guardado en los morrales.
- Objetos prohibidos: Teléfonos celulares, relojes inteligentes, apuntes, cuadernos, hojas, libros.
- En caso de posesión de material no autorizado durante el examen, independientemente se esté manipulando o no, el profesor retirará el parcial y le impondrá nota de 0,0 en el examen. El caso será reportado a la Dirección de Carrera para proceder de acuerdo a lo estipulado en el reglamento de estudiantes de la Universidad.

## Comunicación durante el curso

---

- Discord: <https://discordapp.com/download>
- Enlace de invitación al servidor privado: <https://discord.gg/ApGwFvs>
- Contenidos del curso.
- Trabajos propuestos.
- Discusiones y preguntas.

# Fundamentos de Sistemas de Control

---

- Ingenieros → crean productos para ayudar a las personas.



- Ingenieros → crean productos para ayudar a las personas.
- Entender, modelar y controlar materiales y fuerzas de la naturaleza.

- Ingenieros → crean productos para ayudar a las personas.
- Entender, modelar y controlar materiales y fuerzas de la naturaleza.
- Ingeniería de sistemas de control:

- Ingenieros → crean productos para ayudar a las personas.
- Entender, modelar y controlar materiales y fuerzas de la naturaleza.
- Ingeniería de sistemas de control:
  - Área de la ingeniería que busca entender, modelar y controlar segmentos del ambiente, llamados **sistemas**.

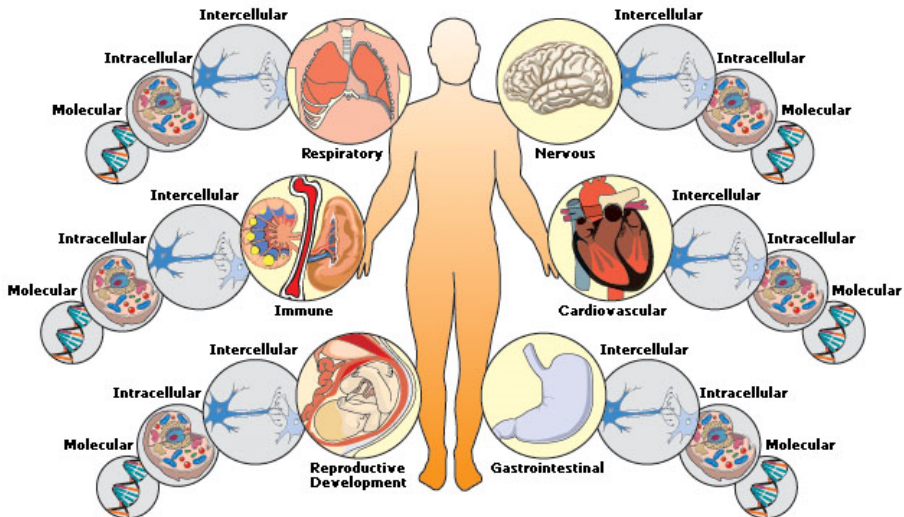
- Ingenieros → crean productos para ayudar a las personas.
- Entender, modelar y controlar materiales y fuerzas de la naturaleza.
- Ingeniería de sistemas de control:
  - Área de la ingeniería que busca entender, modelar y controlar segmentos del ambiente, llamados **sistemas**.
  - Basada en los principios de teoría de retroalimentación, análisis de sistemas lineales.

- Ingenieros → crean productos para ayudar a las personas.
- Entender, modelar y controlar materiales y fuerzas de la naturaleza.
- Ingeniería de sistemas de control:
  - Área de la ingeniería que busca entender, modelar y controlar segmentos del ambiente, llamados **sistemas**.
  - Basada en los principios de teoría de retroalimentación, análisis de sistemas lineales.
  - Fuertes fundamentos matemáticos y gran aplicabilidad en diversas áreas.

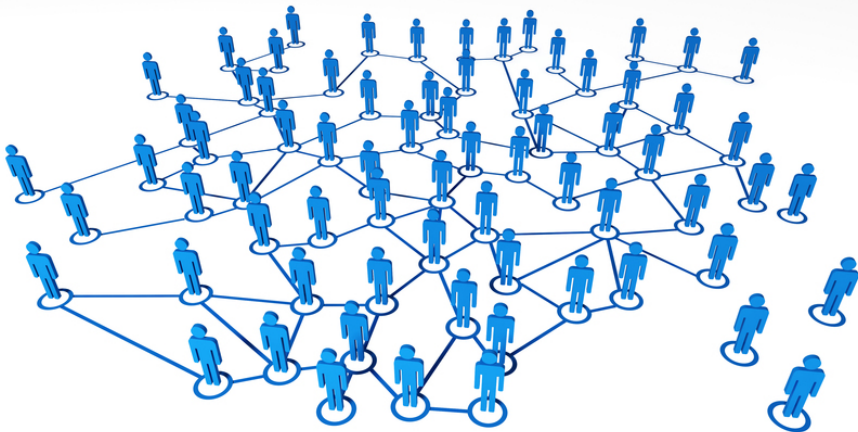
# ¿Qué es un sistema?



# ¿Qué es un sistema?



# ¿Qué es un sistema?





- Interconexión de componentes, dispositivos o subsistemas.

- Interconexión de componentes, dispositivos o subsistemas.
- Proceso que toma unas entradas y las transforma en salidas.



- Interconexión de componentes, dispositivos o subsistemas.
- Proceso que toma unas entradas y las transforma en salidas.



- Relación entrada - salida: representa la relación causa - efecto del proceso.

# Sistema

---

- Interconexión de componentes, dispositivos o subsistemas.
- Proceso que toma unas entradas y las transforma en salidas.



- Relación entrada - salida: representa la relación causa - efecto del proceso.
- Existe una frontera que separa los componentes internos del mundo externo.

# Sistema

---

- Interconexión de componentes, dispositivos o subsistemas.
- Proceso que toma unas entradas y las transforma en salidas.



- Relación entrada - salida: representa la relación causa - efecto del proceso.
- Existe una frontera que separa los componentes internos del mundo externo.
- Enfoque sistemático para analizar el comportamiento: modelos matemáticos.

- Interconexión de componentes que forman una configuración que provee una respuesta deseada.

# Sistema de Control

- Interconexión de componentes que forman una configuración que provee una respuesta deseada.
- Sistema de control de lazo abierto: Usa un **controlador** y un **actuador** para obtener la respuesta del proceso deseada.

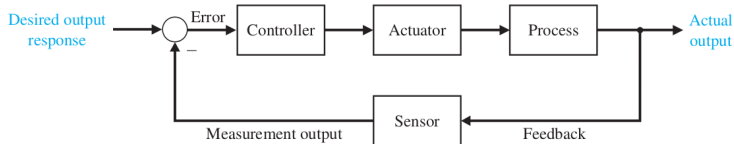


# Sistema de Control

- Interconexión de componentes que forman una configuración que provee una respuesta deseada.
- Sistema de control de lazo abierto: Usa un **controlador** y un **actuador** para obtener la respuesta del proceso deseada.

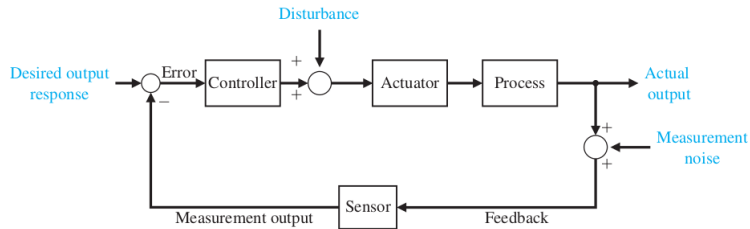


- Sistema de control de lazo cerrado: Utiliza una medida adicional de la salida para compararla con la respuesta deseada.



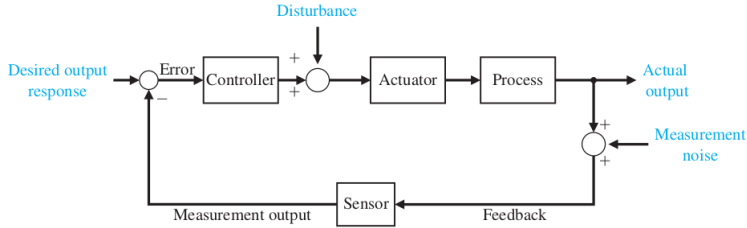


# Sistema de Control



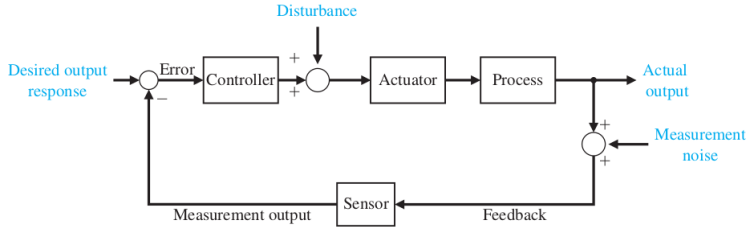
- Referencia (set-point): valor deseado de la variable controlada.

# Sistema de Control



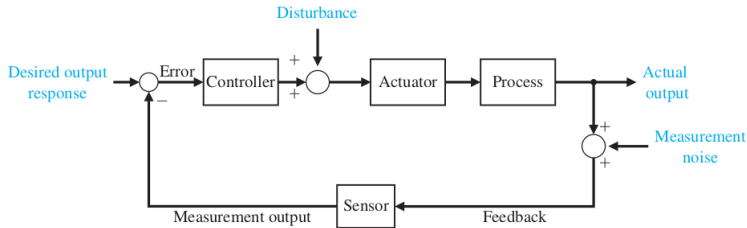
- Referencia (set-point): valor deseado de la variable controlada.
- Variable controlada: cantidad o condición que se mide y controla. Normalmente es la salida del sistema.

# Sistema de Control



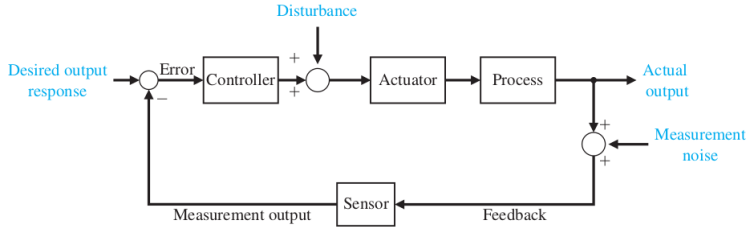
- Referencia (set-point): valor deseado de la variable controlada.
- Variable controlada: cantidad o condición que se mide y controla. Normalmente es la salida del sistema.
- Variable manipulada: cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada.

# Sistema de Control



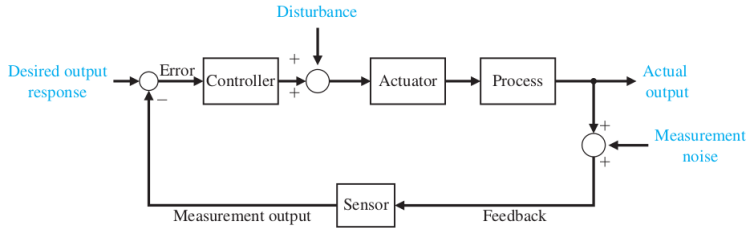
- Referencia (set-point): valor deseado de la variable controlada.
- Variable controlada: cantidad o condición que se mide y controla. Normalmente es la salida del sistema.
- Variable manipulada: cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada.
- Perturbación: señal externa que ocasiona que la variable de control se desvíe del punto de control.

# Sistema de Control



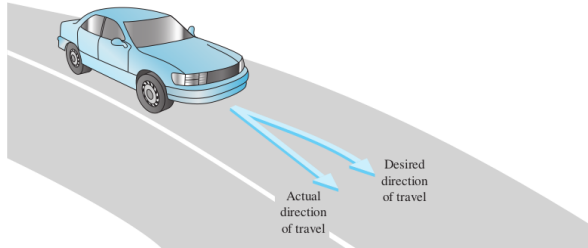
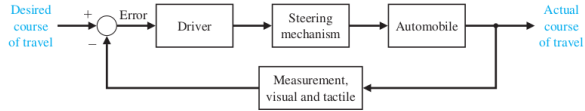
- Ruido de medida: señal externa que contamina la medición hecha con el sensor sobre la variable controlada.

# Sistema de Control

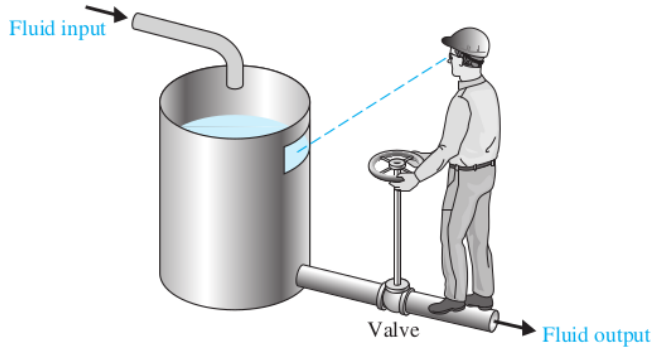


- Ruido de medida: señal externa que contamina la medición hecha con el sensor sobre la variable controlada.
- Error: Diferencia entre la referencia y la medición obtenida mediante el sensor.

# Sistemas de Control - Ejemplos: Vehículos autónomos

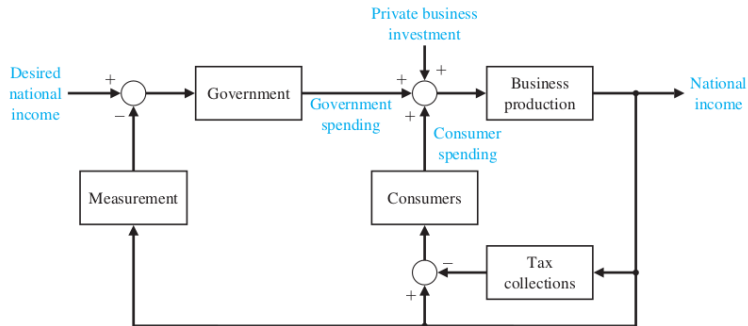


## Sistemas de Control - Ejemplos: Operador humano en el lazo de control

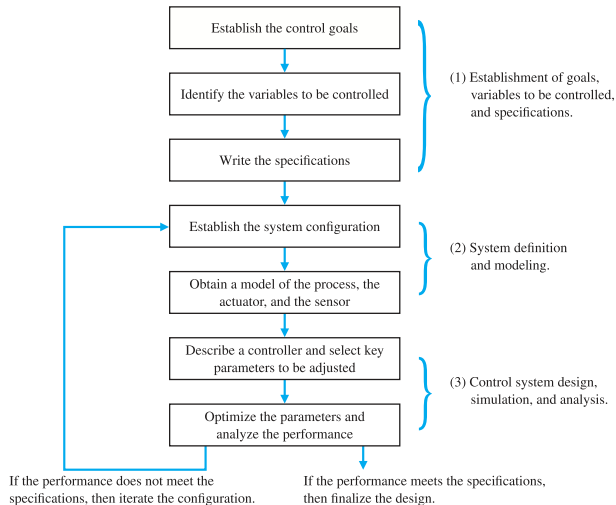




# Sistemas de Control - Ejemplos: Ingresos en una nación



**Objetivo:** Obtener la configuración, especificaciones e identificación de los parámetros clave del sistema propuesto para satisfacer los requerimientos.



1. Describa sensores típicos que puedan usarse para medir las siguientes variables:
  - Posición lineal
  - Posición rotacional
  - Temperatura
  - Presión
  - Fuerza
  - Flujo de líquido
  - Campo magnético terrestre
2. Describa actuadores típicos que puedan convertir las siguientes variables:
  - Energía eléctrica en energía mecánica
  - Deformación mecánica en energía eléctrica
  - Energía química en energía cinética
  - Calor en energía eléctrica

3. Una cámara con foco automático ajusta la distancia entre el lente y el sensor usando un rayo infrarojo para determinar la distancia al objetivo. Realice un bosquejo del diagrama de bloques de éste sistema de control especificando los diferentes componentes y señales. Explique brevemente su operación.

4. Considere el péndulo invertido mostrado en la figura. El objetivo es mantener el péndulo en la posición vertical ( $\theta = 0$ ) en la presencia de disturbios. Realice el bosquejo del diagrama de bloques del sistema de control. Identifique el proceso, sensor, actuador y controlador.

