

Control de sistemas

Ing. Andrés Guillermo Molano Jiménez, PhD.

Información general

- Profesor: Ing. Andrés Molano, PhD.
- Correo: amolano@javeriana.edu.co
- Horario:
 - G1 Martes 7 a.m.- 10 a.m.
- Información del curso -> *Brightspace*.
- Laboratorio:
 - Profesor: Ing. David Magín Flórez PhD.
 - d.florez@javeriana.edu.co

Programa del curso

Capítulo 1. Fundamentos de sistemas de control.

Capítulo 2. Diseño de controladores clásicos.

Capítulo 3. Implementación digital de controladores.

Capítulo 4. Control por variables de estado.



Contenido.

- **Capítulo 1. Fundamentos de sistemas de control.**
 - Definición y beneficios de la realimentación (lazo abierto vs cerrado).
 - Diagramas de bloques.
 - Sistemas electromecánicos: Motor D.C.
 - Estabilidad externa (BIBO)
 - Criterio de *Routh-hurwitz*.
 - Error en estado estacionario.
 - Análisis de la respuesta transitoria.
 - Aproximación de modelos (curva de reacción).

Contenido

- **Capítulo 2. Diseño de controladores clásicos.**

- Acciones básicas de control (ON-OFF y PID)
- Métodos de sintonización PID (técnicas heurísticas, criterios óptimos, síntesis por *Dahlin*, ubicación de polos, cancelación polo-cero).
- Implementación de controladores (PID standalone, PLC, DCS).
- Características de los controladores (modo manual o automático, *bumpless transfer*, *reset windup*, acciones directa e inversa, etc.)
- Diseño de compensadores por lugar de las raíces.
- Diseño de compensadores por respuesta en frecuencia.

Contenido

- **Capítulo 3. Implementación digital de controladores.**
 - Introducción al control digital
 - Acondicionamiento de señal
 - Métodos de discretización
 - Soluciones micro-controladas
 - Manejo de actuadores – PWM

Contenido

- **Capítulo 4. Control por variables de estado.**
 - Representación en variables de estado.
 - Controlabilidad y observabilidad.
 - Transformación de similitud.
 - Formas canónicas.
 - Estabilidad interna.
 - Diseño por ubicación de polos.
 - Linealización.
 - Diseño de observadores de estado.

Competencias disciplinares

- Funcionamiento y especificaciones de desempeño de sistemas de control realimentado
- Diseño de controladores lineales de sistemas de una sola entrada y una sola salida.
- Uso de sistemas micro-controlados para la implementación digital de controladores lineales.
- Implementación de etapas de acondicionamiento de señal en interfaces analógicas y digitales.

Resultados de formación

- Expresar los requerimientos de diseño de controladores lineales a partir de unas especificaciones de desempeño dadas (CDIO 4.3.3) (NUCLEAR A).
- Desarrollar algoritmos de control siguiendo una metodología de diseño en ingeniería (CDIO 4.4.1) (NUCLEAR B).
- Implementar un controlador lineal sobre un sistema micro-controlado (CDIO 4.5.4) (NUCLEAR C).
- Aplicar conceptos de acondicionamiento de señal para el diseño de lazos de control realimentado en tiempo discreto (CDIO 4.4.3) (NUCLEAR D).
- Utilizar tablas, gráficos y diagramas de bloques para reportar el desempeño de un sistema de control mediante documentos técnicos (CDIO 3.2.5) (NUCLEAR A).

Evaluación

- | | |
|-------------------------------------|-----------------------------|
| • Tareas | 10% |
| • Examen parcial | 25% (semana 8) |
| • Examen final | 25% (semana 17 o 18) |
| • Laboratorios y proyecto parte I. | 20% (Semana 13) |
| • Laboratorios y proyecto parte II. | 20% (Semana 18) |

Recursos bibliográficos

- 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.
- OGATA Katsuhiko. *INGENIERÍA DE CONTROL MODERNA*. 4ta. Edición. Madrid: Pearson Prentice Hall. 2003.
- CHEN Chi-Tsong. *ANALOG AND DIGITAL CONTROL SYSTEM DESIGN: Transfer-Function, State-Space, and Algebraic Methods*. Philadelphia: Saunders College, 1993.
- Astrom, K. J., & Hägglund, T. (2006). Advanced PID control. *IEEE Control Systems*, Vol. 26. <https://doi.org/10.1109/MCS.2006.1580160>

Clase 1: Introducción

El control está en todas partes....



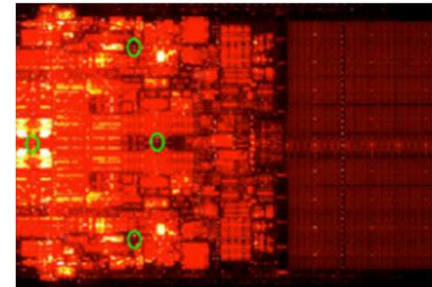
Amplificadores operacionales
Control de ganancia automática



Convertidores de energía
Algoritmos de control de turbinas
Estimación de los disturbios por *LIDAR*



Control y optimización de una
planta de etileno



Control térmico de muchos procesadores de núcleo y multinúcleo

* <https://youtube.com/playlist?list=PLd90-Wkq-9ZFf8XobwPG7HJz0EGogUsqH>

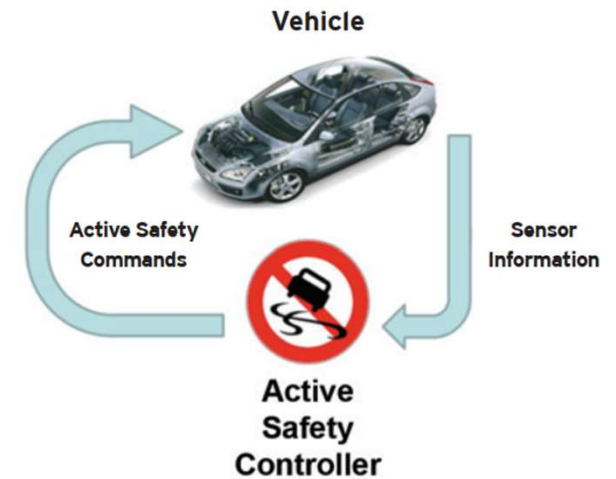
El control está en todas partes....



Sistemas de GNC*



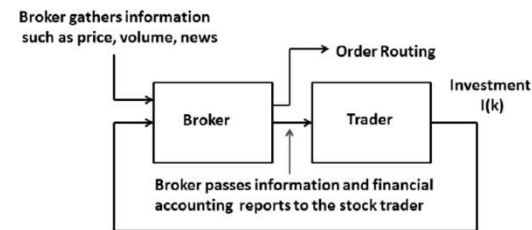
Almacenes inteligentes



Corrección automática de dirección



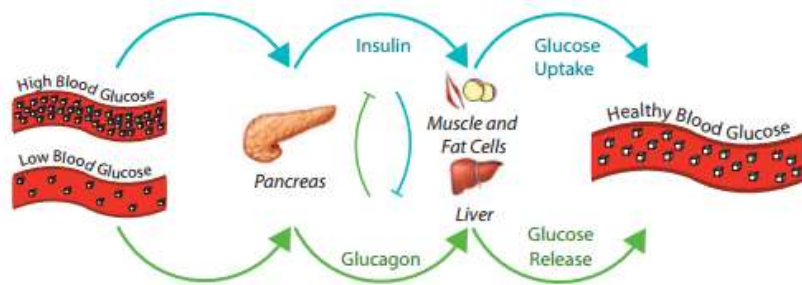
sistemas inteligentes de transporte



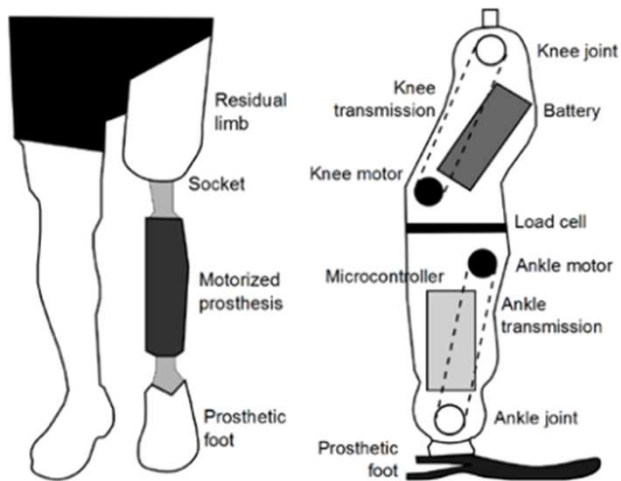
Oportunidades para la teoría del control en la bolsa



El control está en todas partes....



Páncreas artificial



Control de piernas protésicas motorizadas

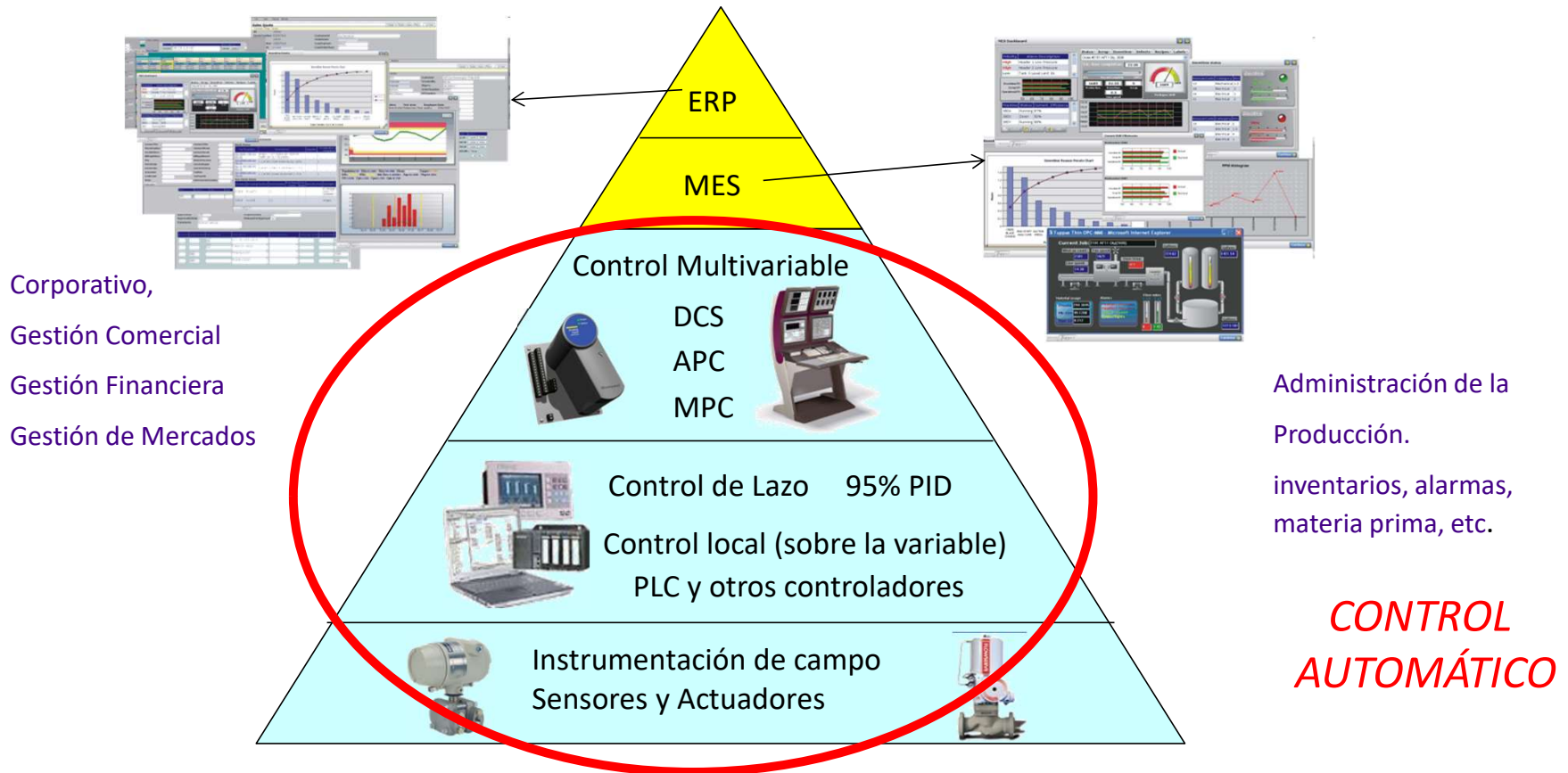


Control en la Rehabilitación del Accidente Cerebrovascular

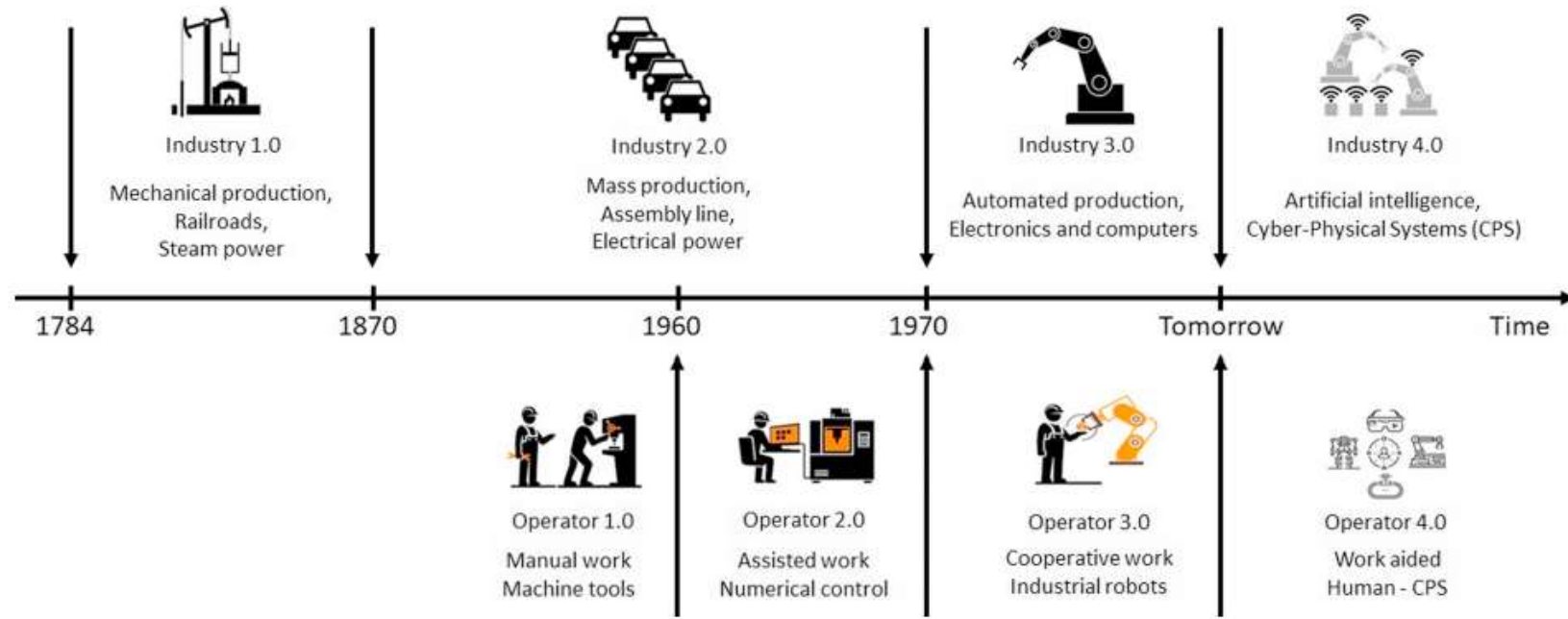


Robots de asistencia para subir escaleras

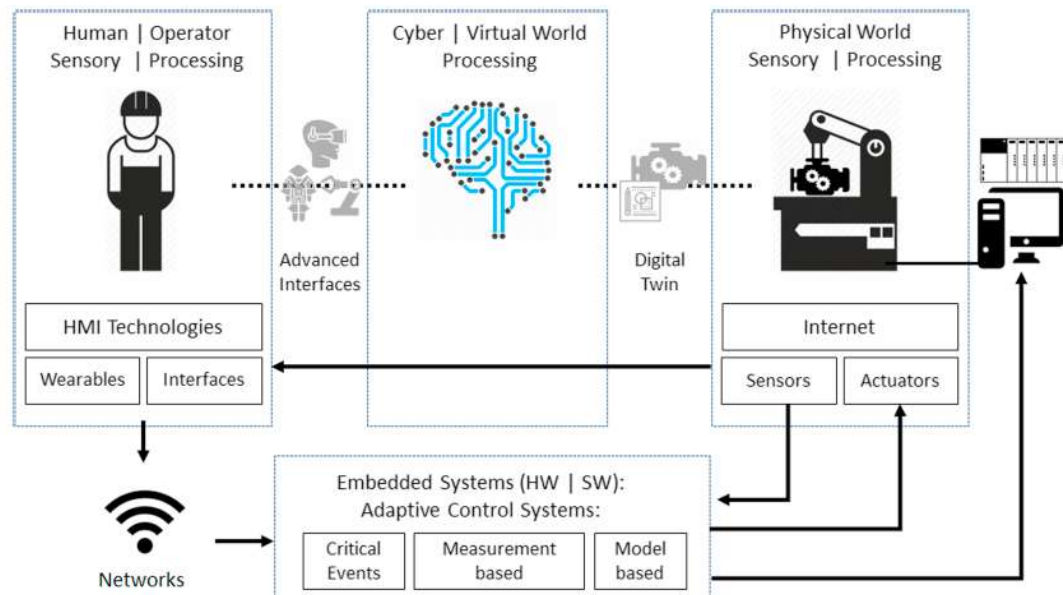
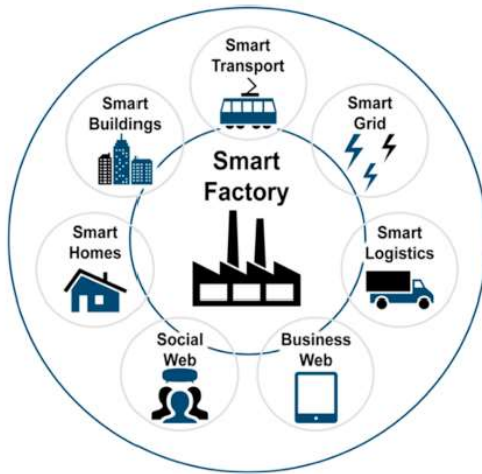
Pirámide de Automatización



Revolución de la Industria



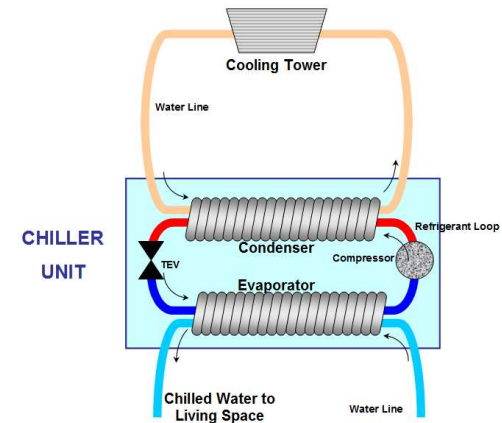
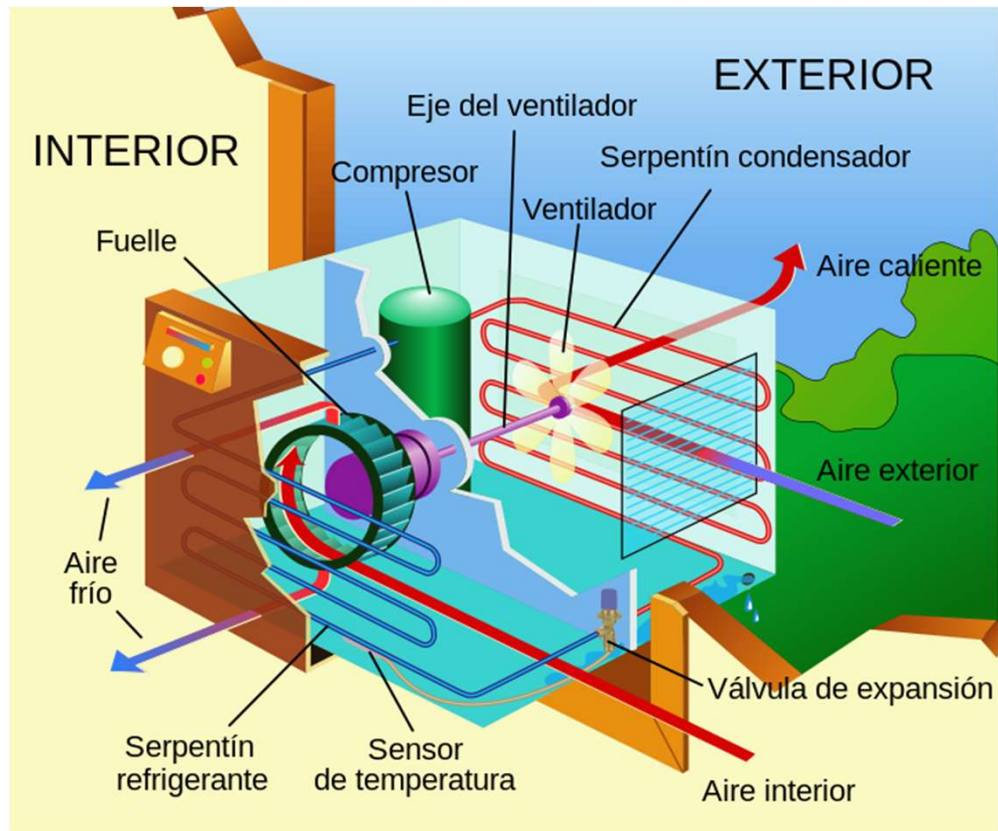
Smart Factory



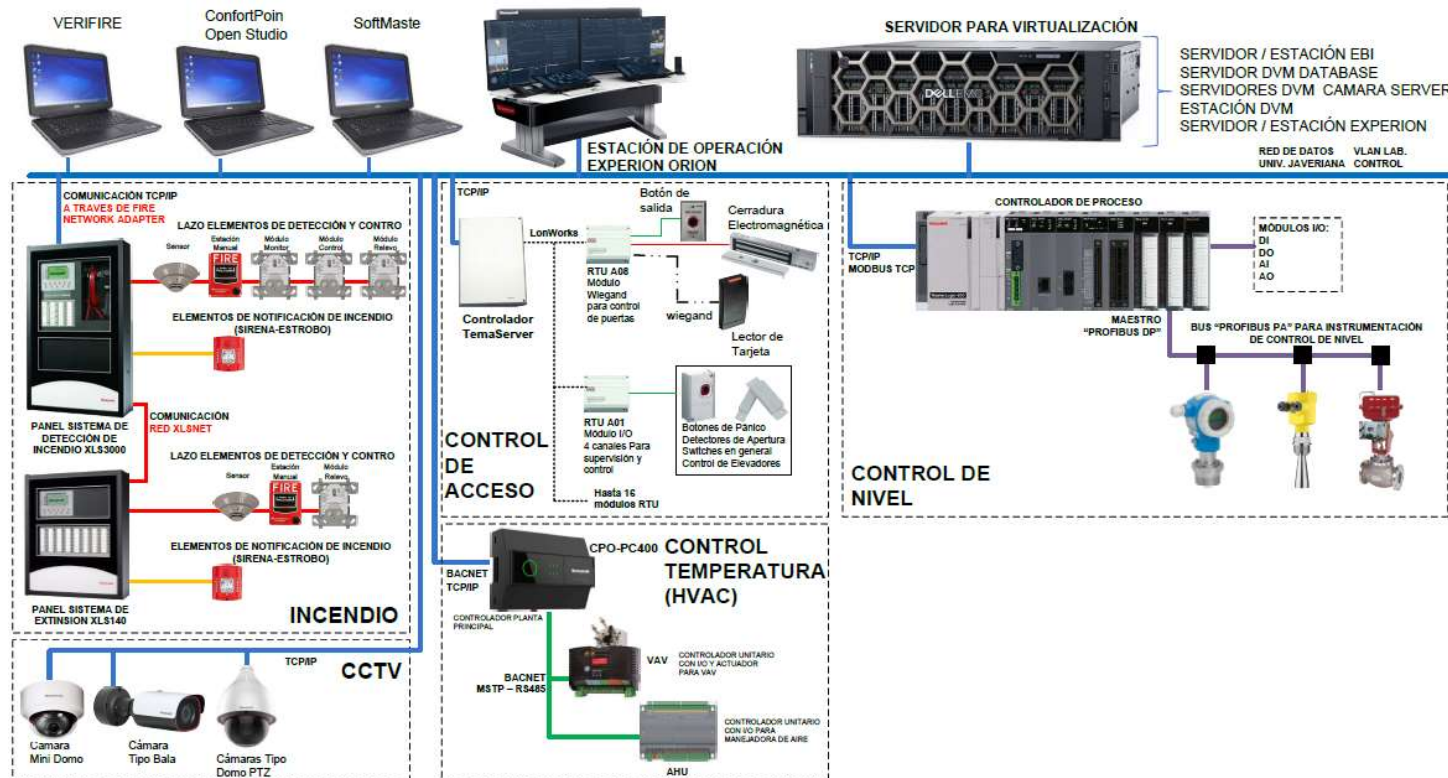
Orion Station



Aplicación: HVAC



Ejemplo arquitectura sistema de control



Ejemplos en la vida diaria

- Actualmente los sistemas de control se encuentran en todas partes.
- En el hogar:
 - Hornos
 - Lavadoras
 - Neveras
 -



Sensor de Turbidez
(suciedad ropa)



Sensores de Carga
(peso ropa)



Lavadora "Fuzzy Logic"

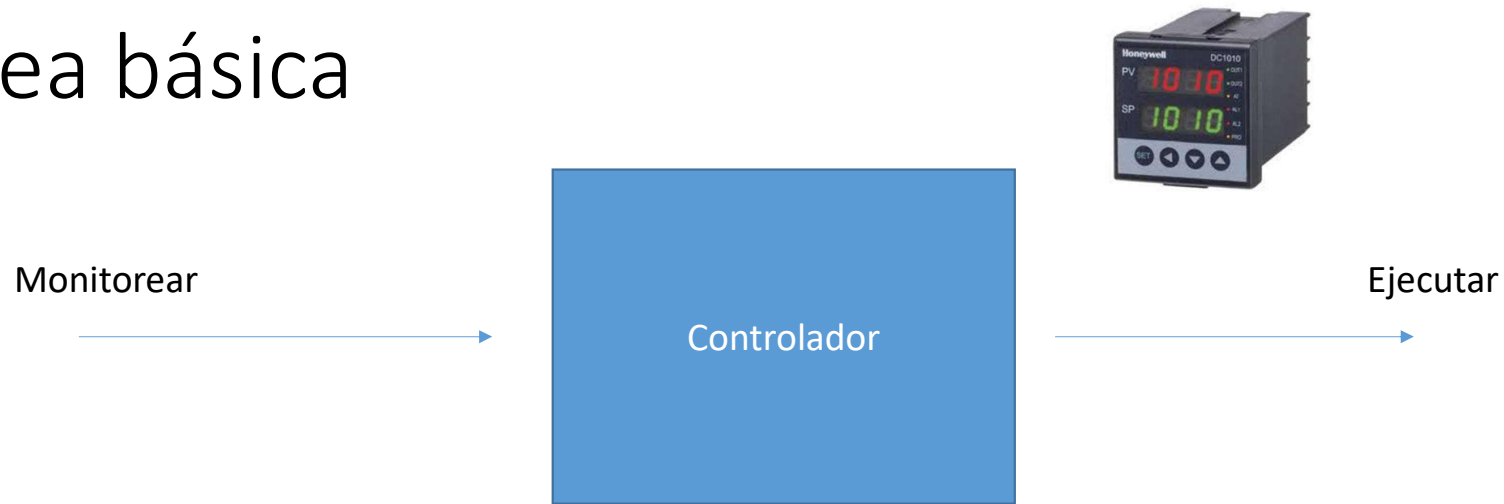


Sensor de
Presión del agua



Controlador
"Automático"

Idea básica



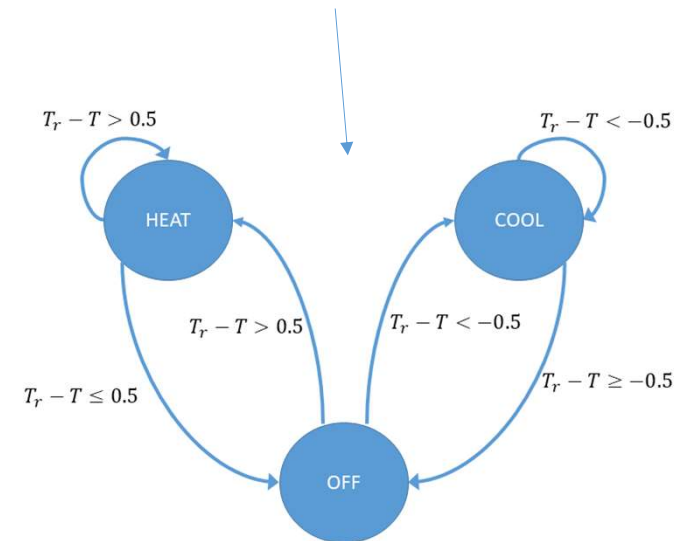
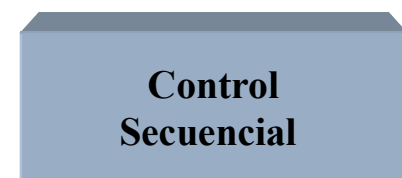
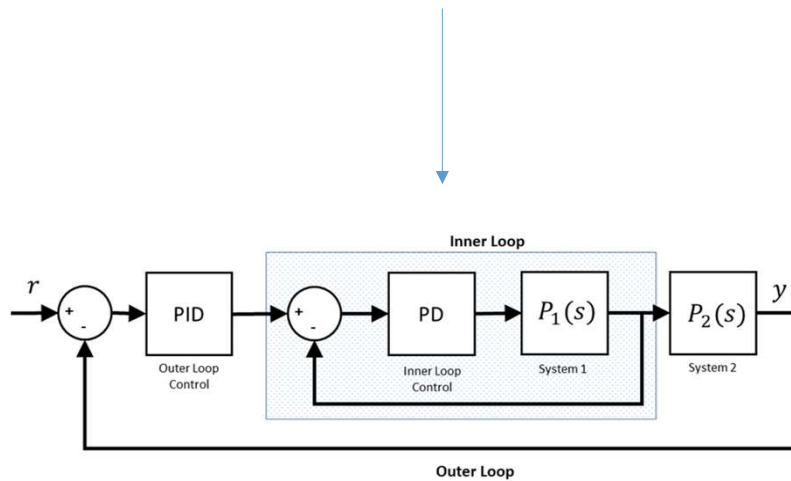
Controlar un sistema físico es mantener un conjunto de condiciones deseadas por medio del ajuste de unas variables seleccionadas, a pesar de las perturbaciones causadas por variables desconocidas.

Sistema de Control: Interconexión de componentes que conforman un sistema, el cual puede proveer una respuesta deseada.

Objetivos del control

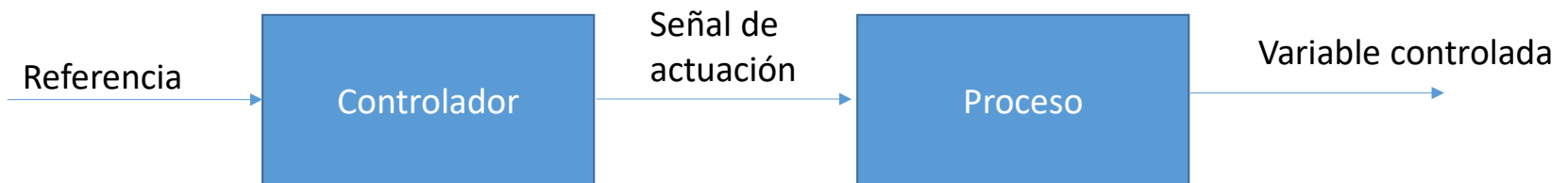
1. Seguridad.
2. Protección ambiental.
3. Protección del equipo.
4. Operación y producción estable.
5. Calidad del producto.
6. Utilidad.
7. Monitoreo y diagnóstico.

Dominios del control



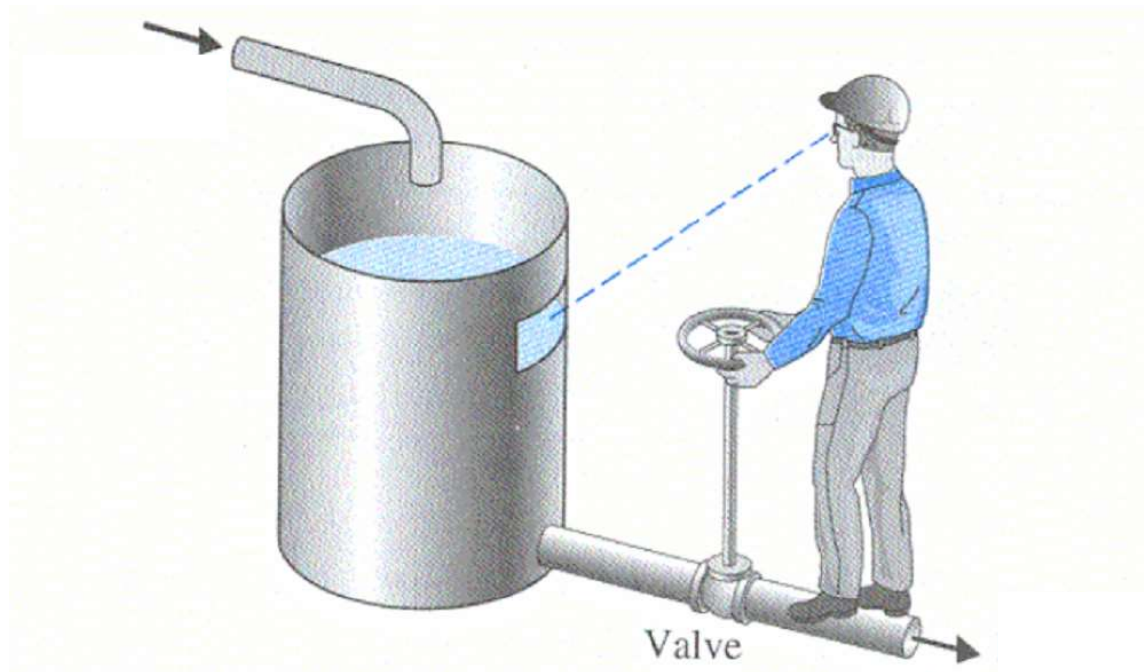
Control en lazo abierto

- Componentes:
 - Controlador
 - Proceso controlado



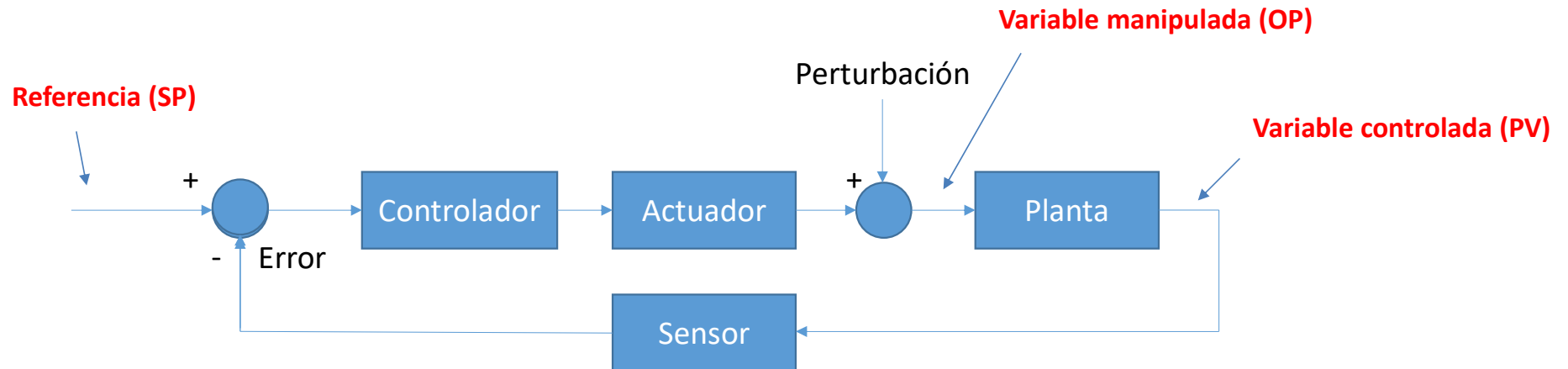
Control manual

- ¿Qué acciones ejecuta el operario para mantener el flujo?

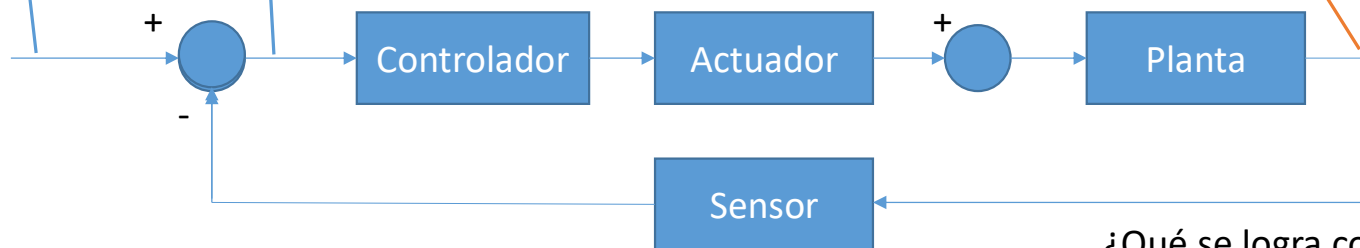
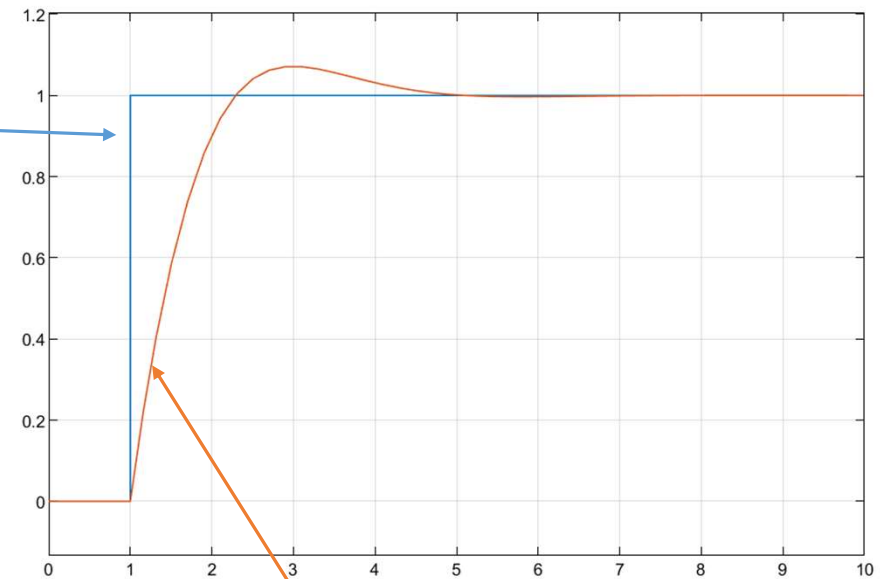
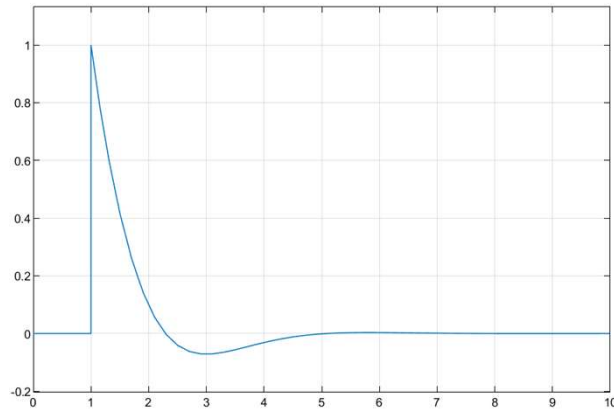


Control en lazo cerrado (realimentación)

- Problemas de control: seguimiento y regulación



Control en lazo cerrado



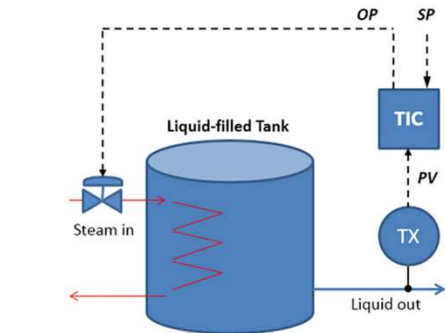
¿Qué se logra con la realimentación negativa?

Control en lazo cerrado

- Componentes:
 - Sensor o elemento primario.
 - Transmisor o elemento secundario.
 - Controlador.
 - Elemento final de control o Actuador.
 - Proceso.
- Operaciones:
 - Medición
 - Decisión
 - Acción

Términos importantes

- Variable manipulada (OP – *Output* o MP – *manipulated variable*)
- Variable controlada (PV – *process variable*)
- Referencia (SP - *setpoint*)
- Error = $SP - PV$
- Proceso
- Perturbación (disturbios de entrada, disturbios externos, cambios de *setpoint*).



Faceplate de un controlador

HP Sep PC

Connections Parameters Monitor Stripchart User Variables Notes

Parameters

Configuration
Advanced
Autotuner
IMC Design
Scheduling
Alarms
PV Conditioning
Signal Processing
FeedForward
Model Testing
Initialization

Operational Parameters

Action: ☐ Reverse ☒ Direct

SP Mode: ☒ Local ☐ Remote

Mode	Auto
Execution	Internal
SP	329.8 psia
PV	329.6 psia
OP	54.65 %

Range

PV Minimum	300.0000 psia
PV Maximum	350.0000 psia

Tuning Parameters

Kc	2.00
Ti	2.00
Td	<empty>

Algorithm Type

Hysys

Algorithm Subtype

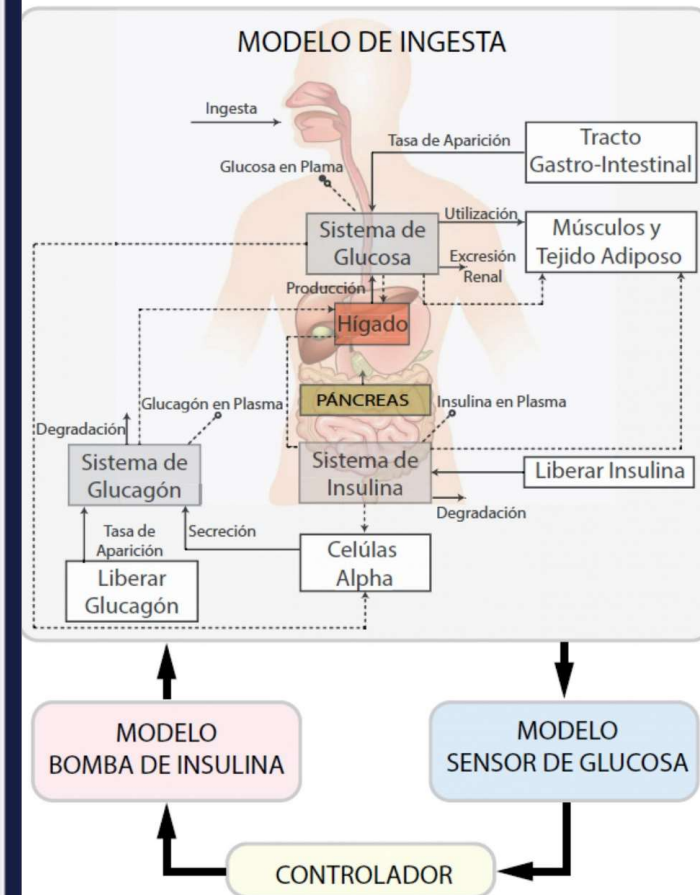
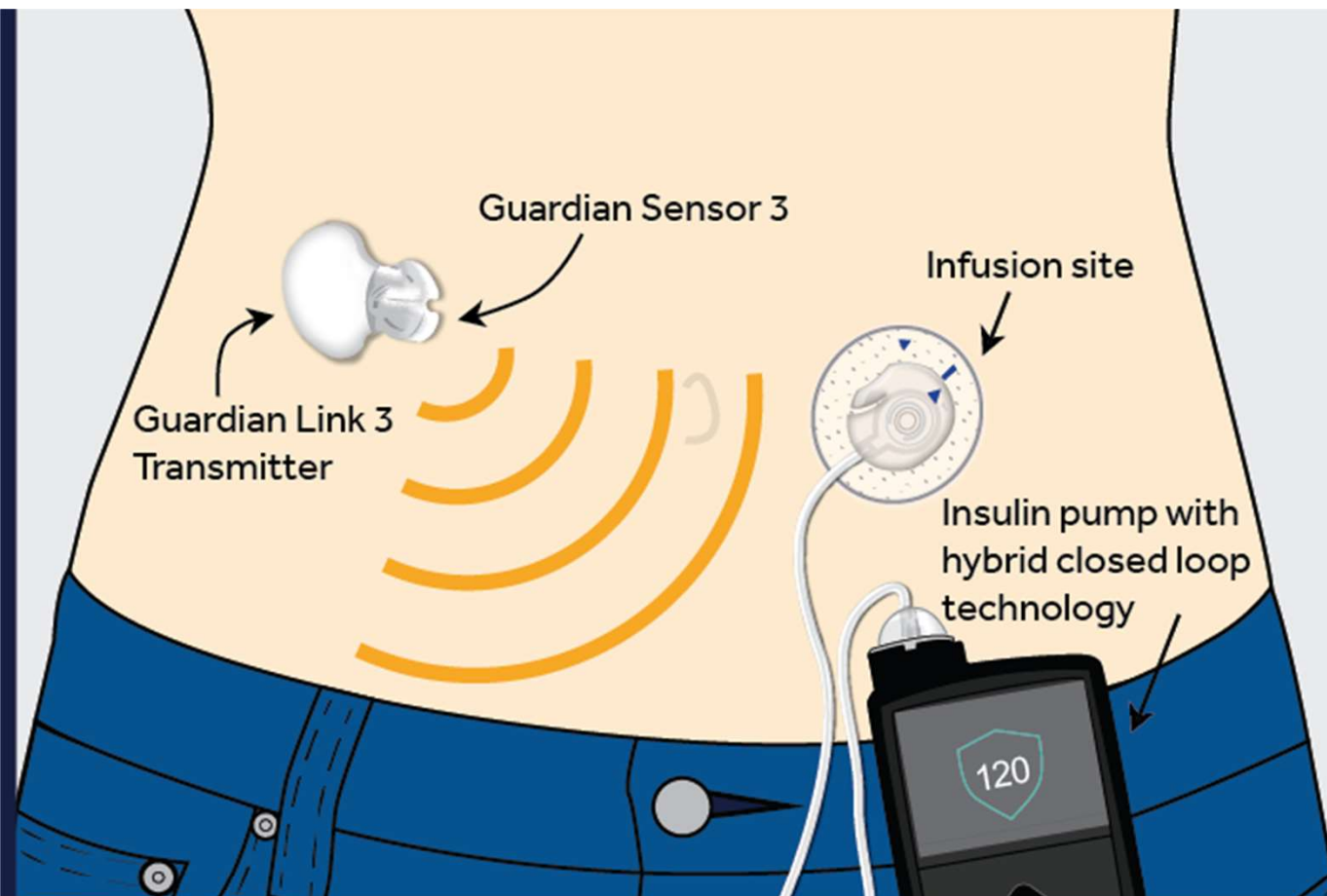
PID Velocity Form

OK

Delete Face Plate...

Diseño de un sistema de control



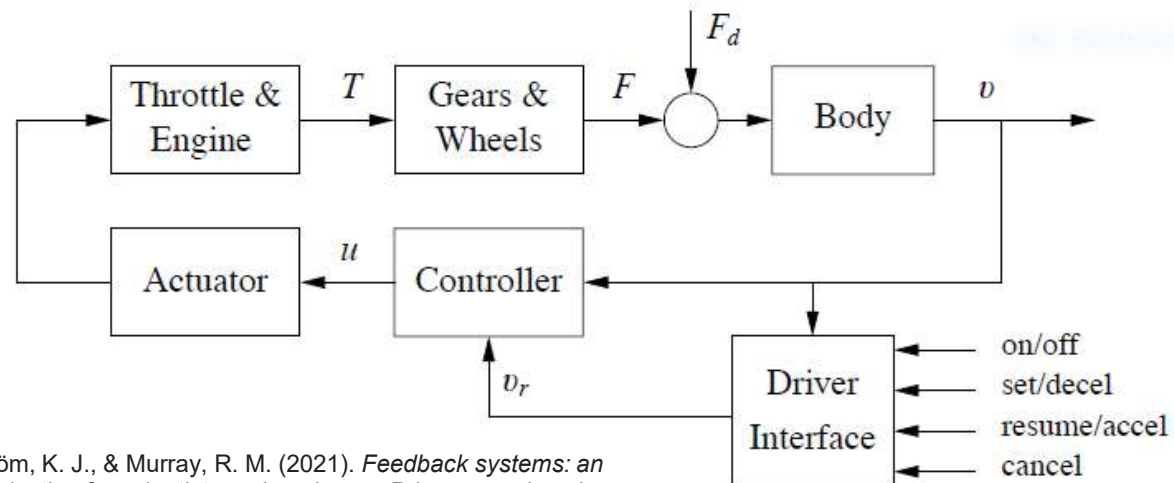


Páncreas Artificial

¿Cuál es el objetivo del sistema y cómo lo logra?

Ejemplo Control de Crucero

Considere un vehículo automotor desplazándose en la posición horizontal:



Aström, K. J., & Murray, R. M. (2021). *Feedback systems: an introduction for scientists and engineers*. Princeton university press.

Principio fundamental:

$$m \frac{dv}{dt} = F - F_d.$$

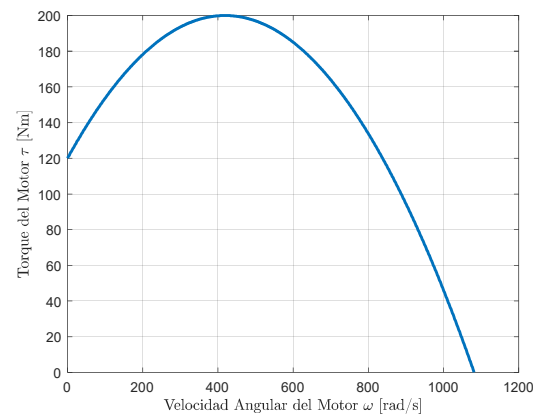
El modelo de la fuerza del motor

La Fuerza F es generada por el Motor, cuyo torque es proporcional a el combustible inyectado, el cual es proporcional a la señal de control

El torque también depende de la velocidad angular del motor

El modelo que expresa esta relación se presenta a continuación

$$T_m(\omega) = u(t)T_{max} \left(1 - \beta \left(\frac{\omega}{\omega_{max}} - 1 \right)^2 \right)$$



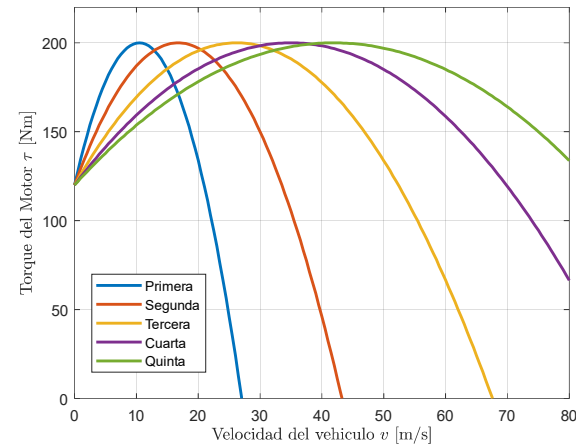
La velocidad del motor se relaciona con la velocidad del vehículo mediante la siguiente relación $\omega = \frac{n}{r}v := \omega = \alpha_n v$

Por ende, el torque del motor se puede expresar en términos de la velocidad como:

$$T_m(v) = u(t)T_{max} \left(1 - \beta \left(\frac{v}{v_{max}} - 1 \right)^2 \right) = u(t)T(v)$$

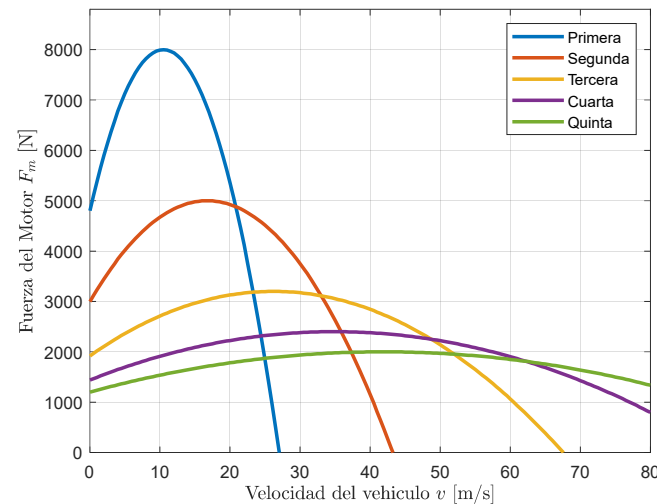
Los valores típicos de α_n para cada marcha son:

Marcha	α_N
Primera	40
Segunda	25
Tercera	16
Cuarta	12
Quinta	10



La Fuerza del Motor se puede expresar entonces como

$$F(v, u) = \alpha_n u(t) T_{max} \left(1 - \beta \left(\frac{v}{v_{max}} - 1 \right)^2 \right)$$



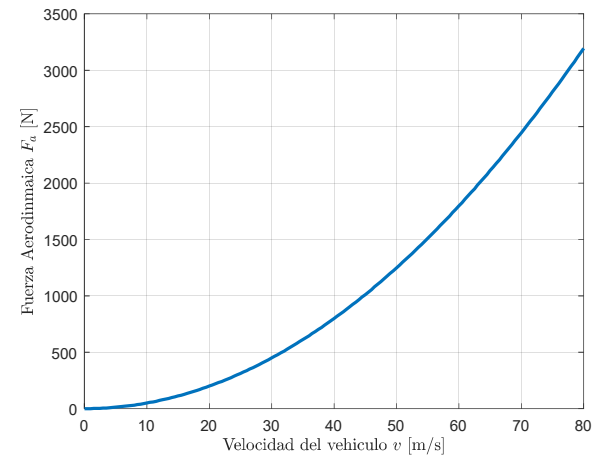
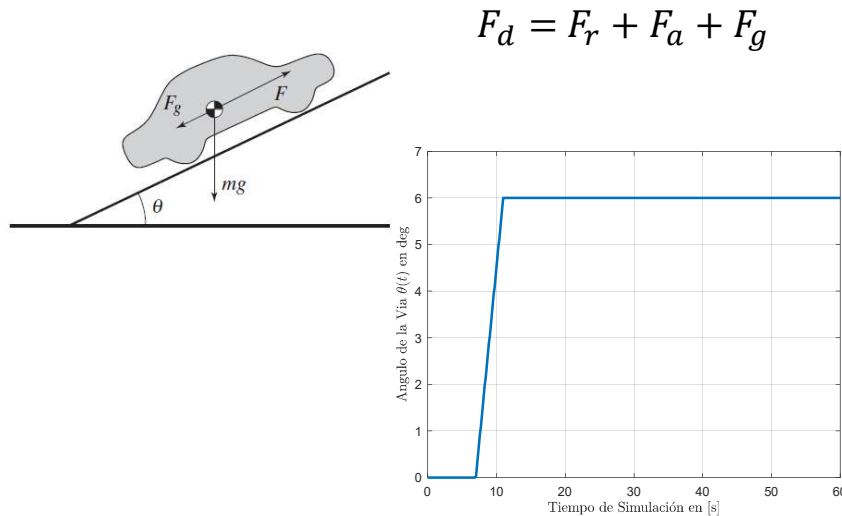
Si la velocidad del carro es 50 km/h, y se encuentra en quinta
¿Cuál sería la fuerza instantánea del motor si presiono el
acelerador hasta el fondo?

Asuma $T_{max} = 200 \text{ Nm}$, $\omega_{max} = 4000 \text{ RPM}$ y $\beta = 0,4$

El modelo de las perturbaciones

El vehículo está sujeto a

- Fuerza de fricción por rodamiento $F_r(v) = mgC_r \text{sgn}(v)$
- Fuerza de tracción aerodinámica $F_a(v) = \frac{1}{2}\rho C_d A v^2$
- Fuerza de Gravedad $F_g(\theta) = mg \sin(\theta)$



El modelo Completo

La Ecuación que domina el movimiento del vehículo es

$$m \frac{dv}{dt} = F(v, u) - \frac{1}{2} \rho C_d A v^2 - mg C_r \operatorname{sgn}(v) - mg \sin(\theta)$$

Al sistema de control de crucero se le instala un controlador de la forma

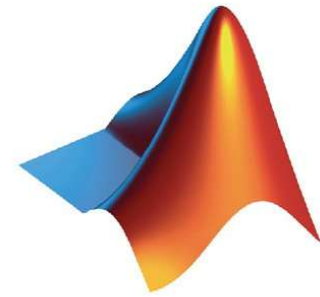
$$\frac{dI}{dt} = e_c, I(0) = I_0 \quad u(t) = k_p e_c + k_i I \quad e_c = v_r - v$$

Para 2 casos

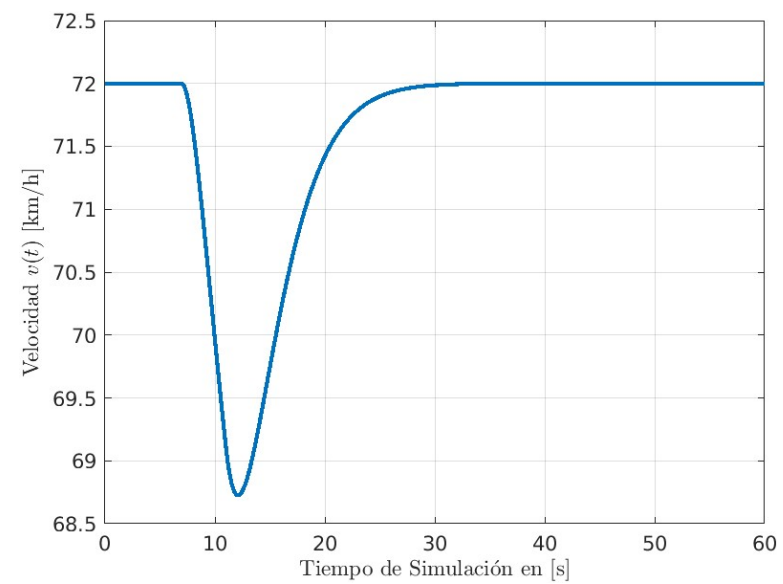
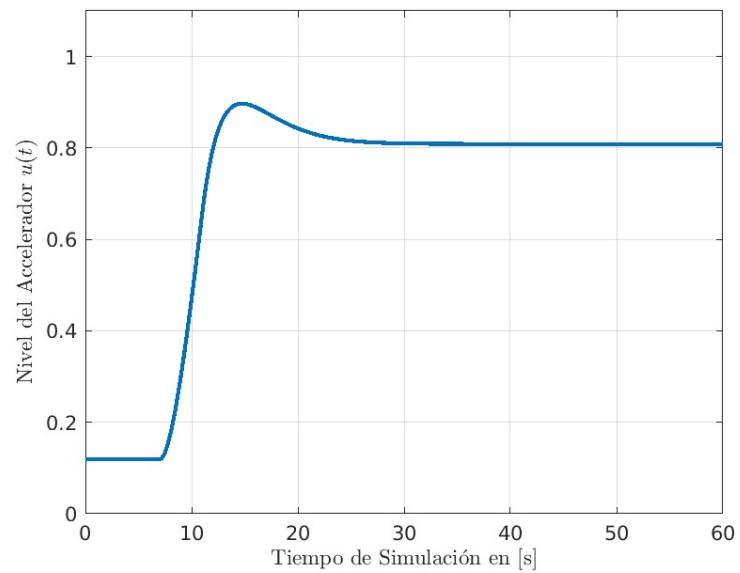
Caso 1 $k_p = 0.5 \quad k_i = 0.1$

Caso 2 $k_p = 0.5 \quad k_i = 0$

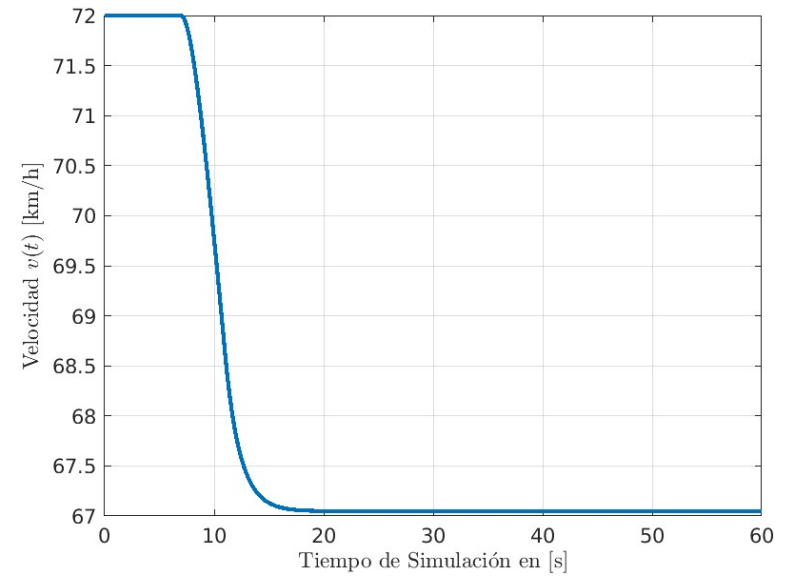
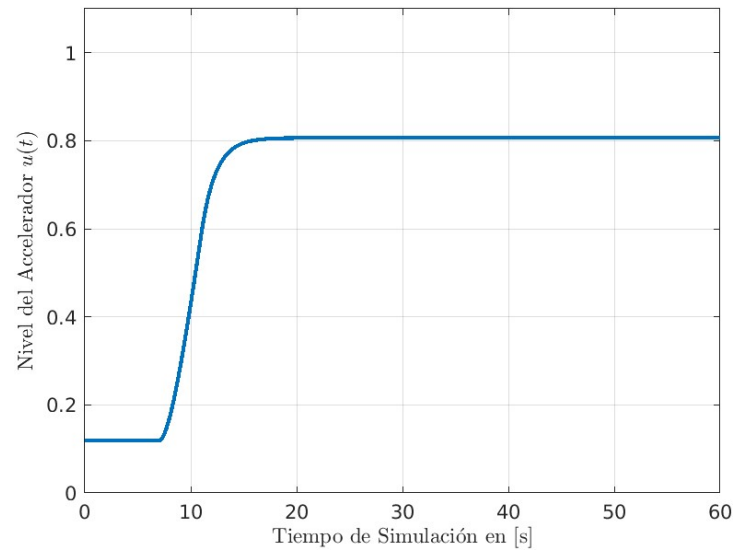
MATLAB®
& SIMULINK®



Resultados Caso 1



Resultados Caso 2





Reflexión

¿Por qué al eliminar la componente Integral La velocidad no regresa a la velocidad de referencia?

Ejercicio de Simulación (Bono 5% Primer Parcial)

- Encuentre el valor de I_0 que permite que la velocidad inicial del vehículo corresponda a los 5x donde x es el último dígito de su Documento de Identidad
- Realicé la simulación empleando el archivo compartido por el profesor y analicé sus resultados en un informe



Beneficios de la realimentación

- Atenuación de la sensibilidad de disturbios y perturbaciones en el sistema
- Aumento del ancho de banda
- Reducción en distorsión no lineal
- Facilidad en el control y ajuste de la respuesta transitoria
- Mejoramiento del rechazo a ruido
- Reducción del error en estado estacionario

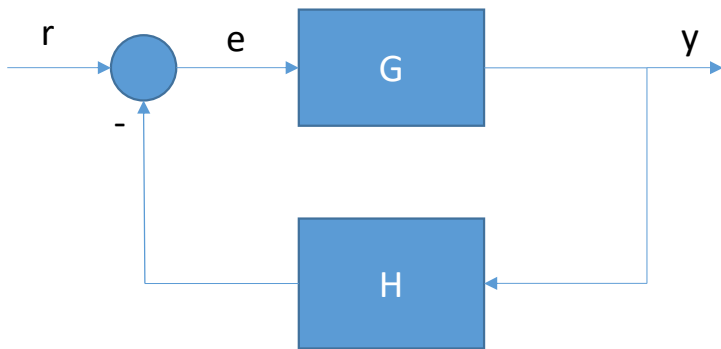
Costo de la realimentación

- Aumento de los componentes y la complejidad del sistema.
- La medición (sensor) es un elemento clave
 - Costoso
 - Introduce ruido e imprecisiones
- Perdida de ganancia.
- Posibilidad de inestabilidad
- A pesar de lo anterior, en la mayoría de los casos, las ventajas superan las desventajas.

Efectos de la realimentación

- Desempeño del sistema:
 - Estabilidad.
 - Ancho de banda.
 - Ganancia.
 - Impedancia.
 - Sensibilidad.
 - Ruido o disturbio externo.
 - Respuesta transitoria.
 - Respuesta en frecuencia.

Efectos en la Ganancia



¿Cuál es la función de transferencia en lazo cerrado?

¿Qué sucede con la ganancia del sistema en lazo cerrado vs. Lazo abierto?

Sí $G \gg H$ tal que $GH \gg 1$, ¿Qué se puede afirmar acerca del comportamiento en lazo cerrado?

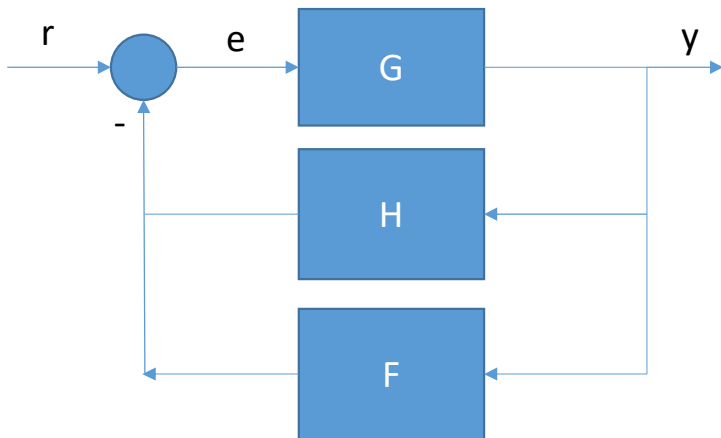
¿Qué pasa si G es no lineal?

Efectos en la estabilidad

- Si $GH = -1$, la salida del sistema es infinita, por lo tanto, inestable (No es la única condición).

$$M = \frac{y}{r} = \frac{G}{1 + GH}$$

- Estabiliza sistemas inestables. Por ejemplo, seleccionando adecuadamente la ganancia F .



$$M = \frac{y}{r} = \frac{G}{1 + GH + GF}$$

Efectos en la sensibilidad

- La sensibilidad de la ganancia neta del sistema M con respecto a las variaciones en G se define como:

$$S_G^M = \frac{\frac{\partial M}{\partial G} \frac{M}{G}}$$

← Porcentaje de cambio en M

← Porcentaje de cambio en G

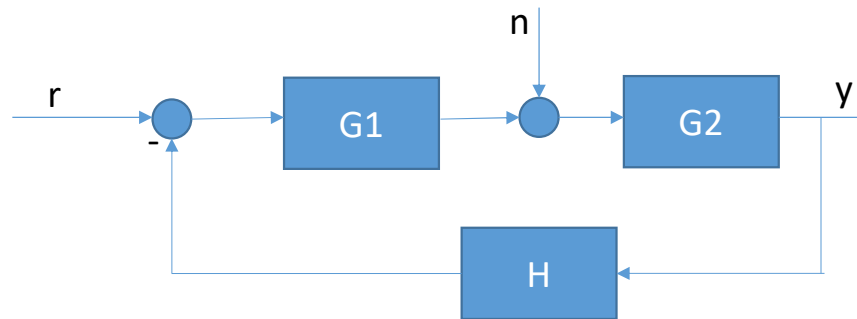
- Ejemplo, la sensibilidad en lazo cerrado es:

$$S_G^M = \frac{\partial M}{\partial G} \frac{G}{M} = \frac{1}{1 + GH}$$

- En lazo abierto: $S_G^M = 1$

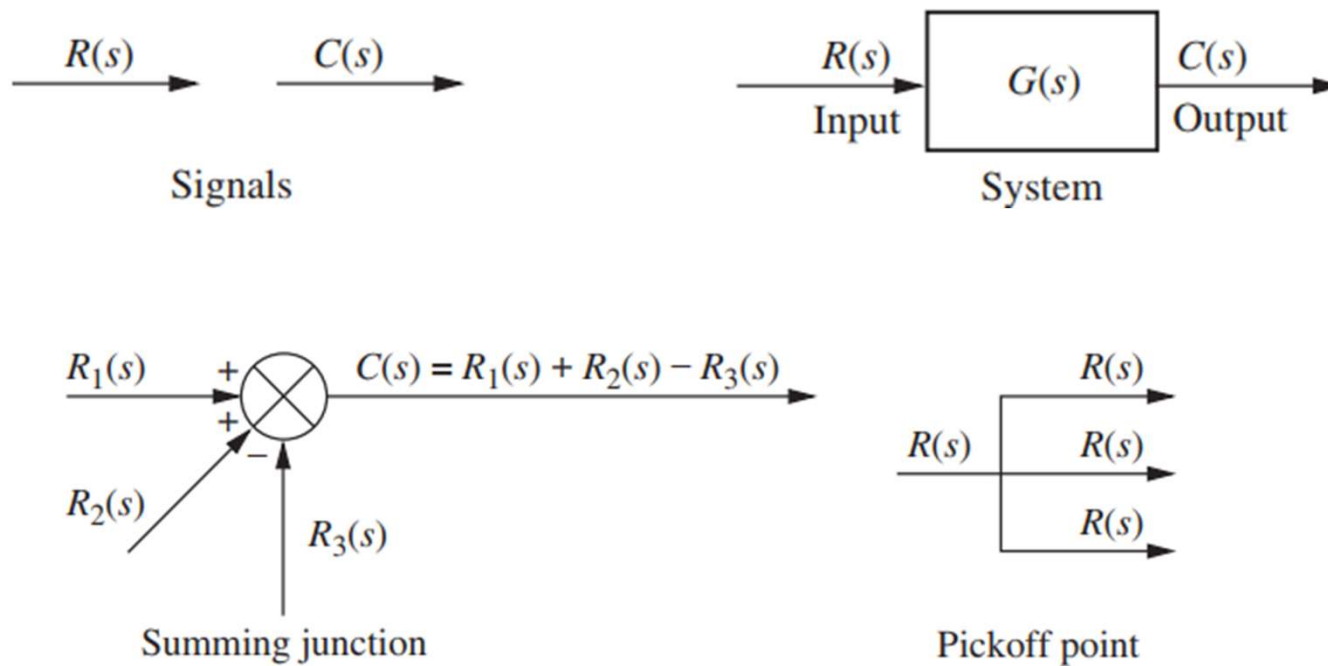
Efectos en ruido y disturbios externos

- Retroalimentación puede reducir el ruido o los disturbios.

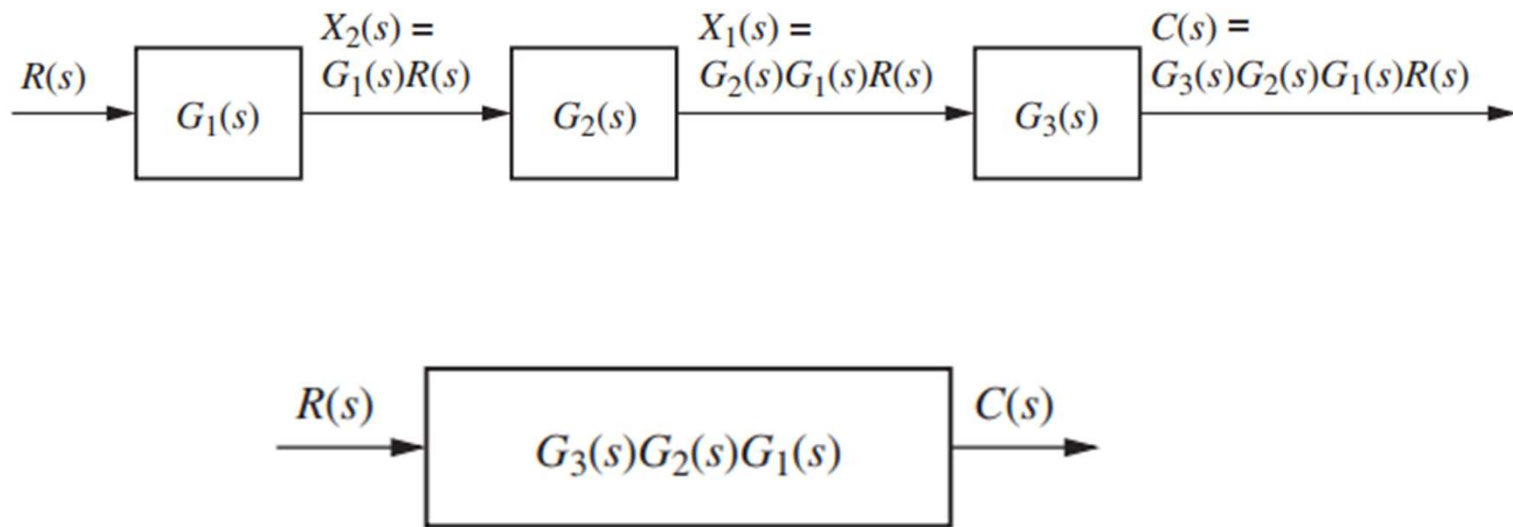


- En lazo abierto: $y = G_2 n$
- En lazo cerrado: $y = \frac{G_2}{1 + G_1 G_2 H} n$

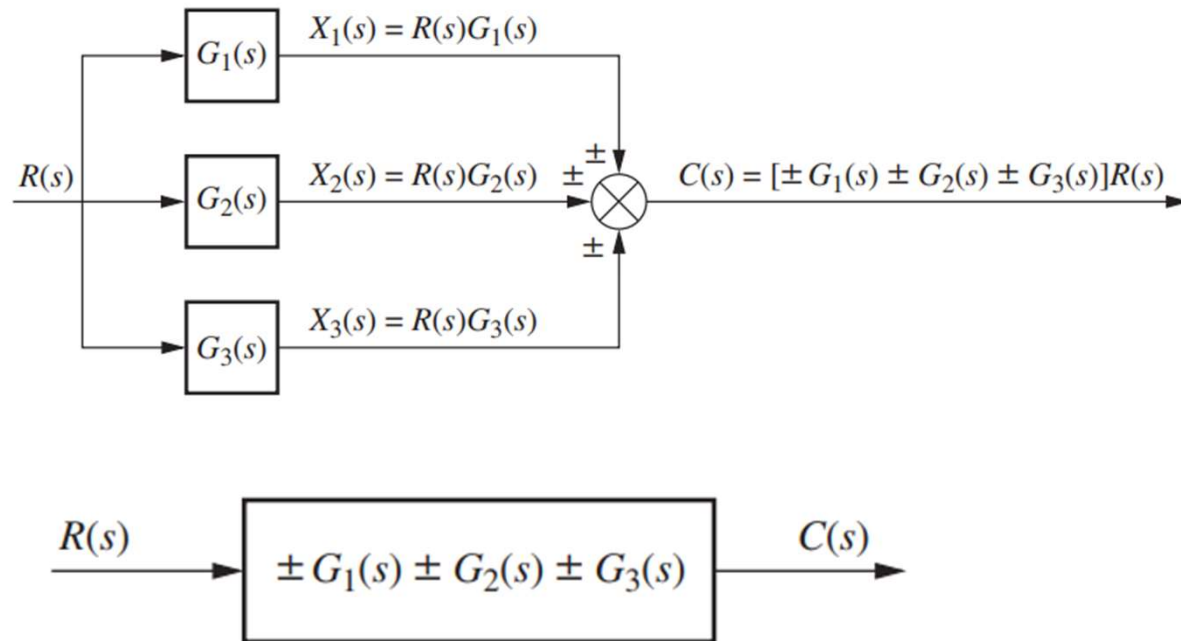
Diagramas de bloques



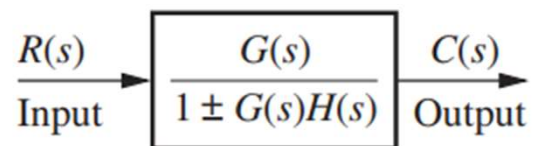
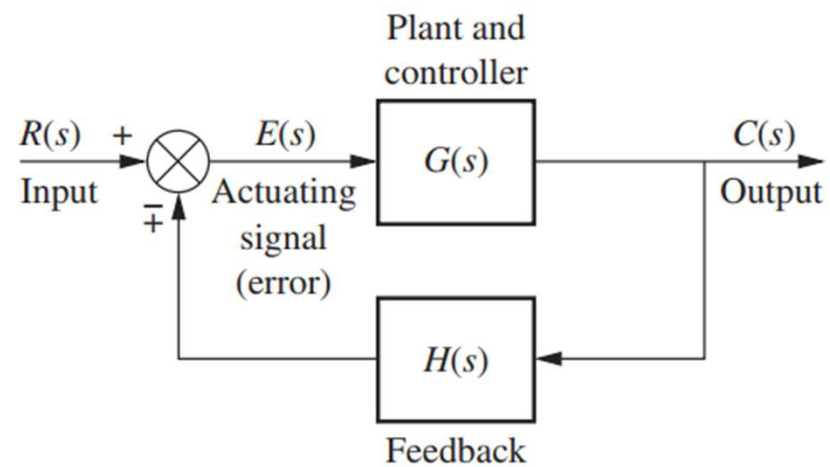
Forma cascada



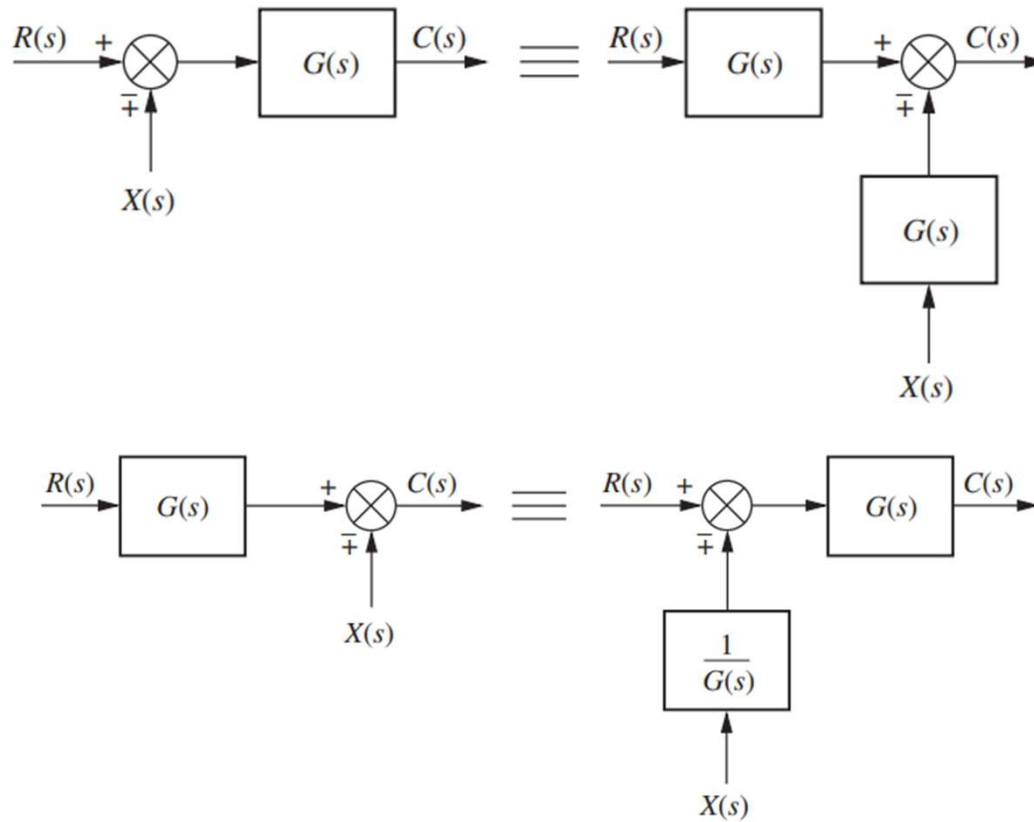
Forma paralela



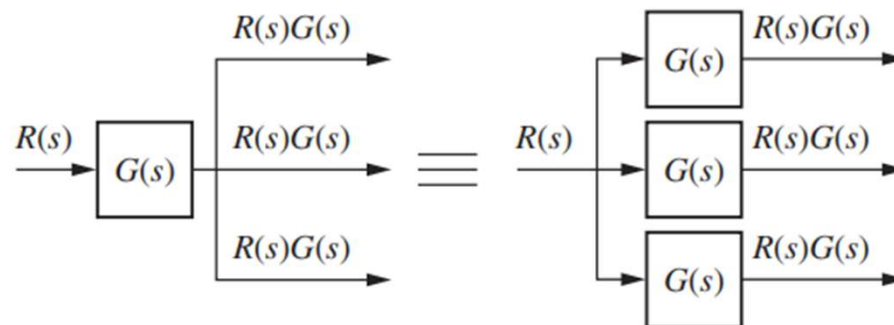
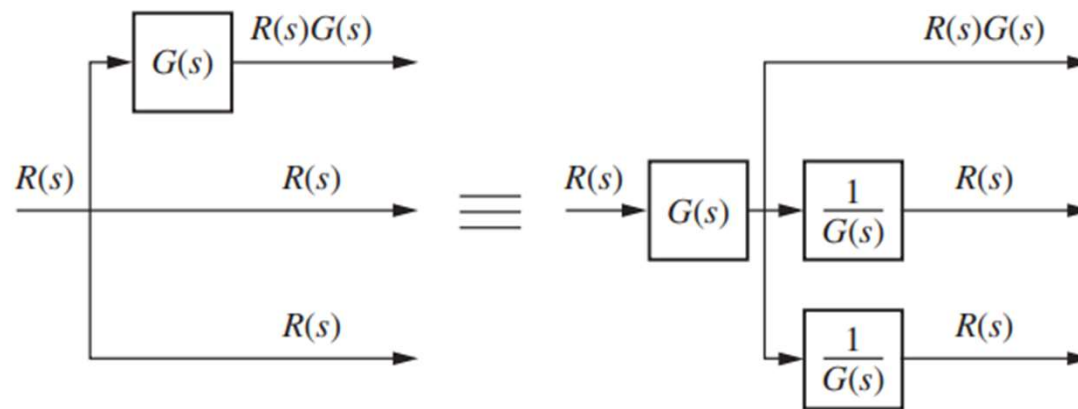
Realimentación



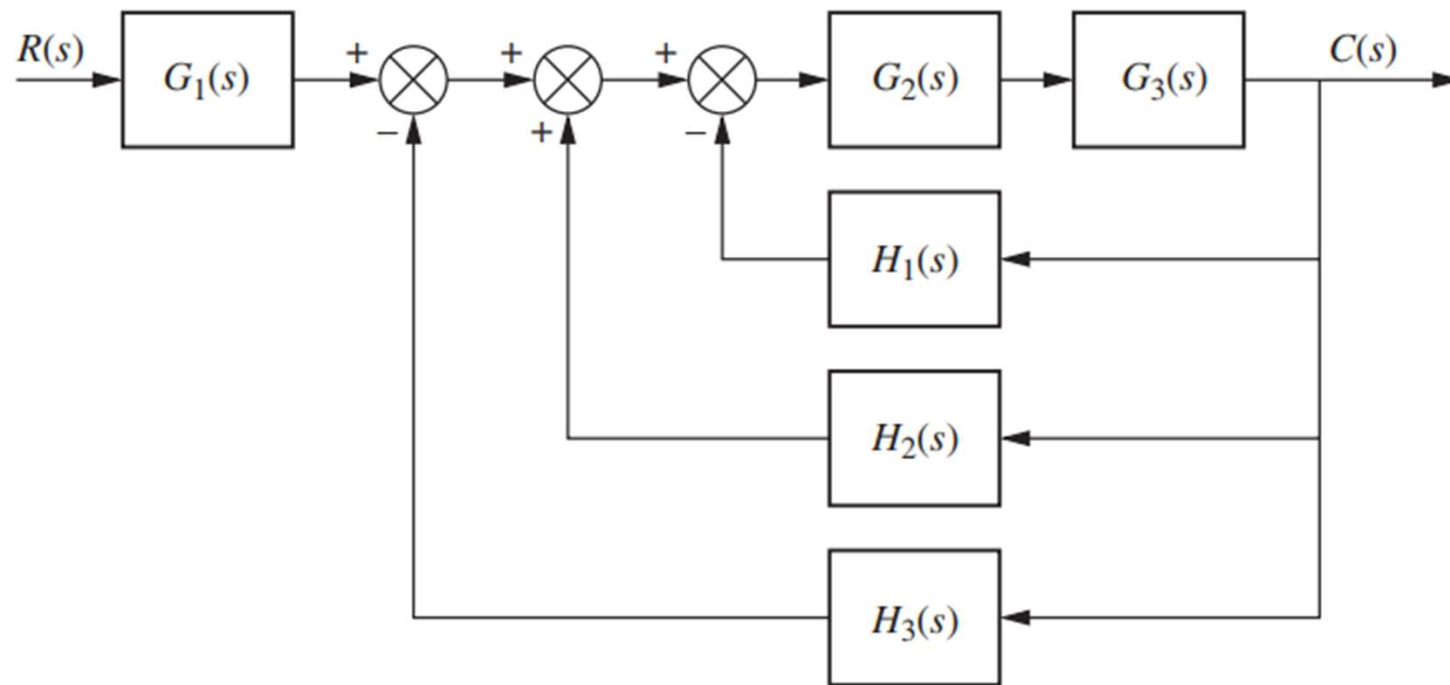
Otras equivalencias



Otras equivalencias



Ejemplo



Ejemplo

