

Control Automático de Procesos

# Introducción al Control de Procesos

Prof. Carlos A. Toro N.  
carlos.toro.ing@gmail.com  
2021

# Qué es Control? Qué es Realimentación?

- ❑ **Control**: uso de información para influir sobre la operación de un dispositivo, máquina, sistema, un ser humano ... casi todo.

*Por qué hacer control?*

*Porque si podemos influir sobre la operación de algo, tendremos mejores resultados (si lo hacemos bien). Ej. Si podemos controlar las emisiones, podemos tener un ambiente más saludable.*

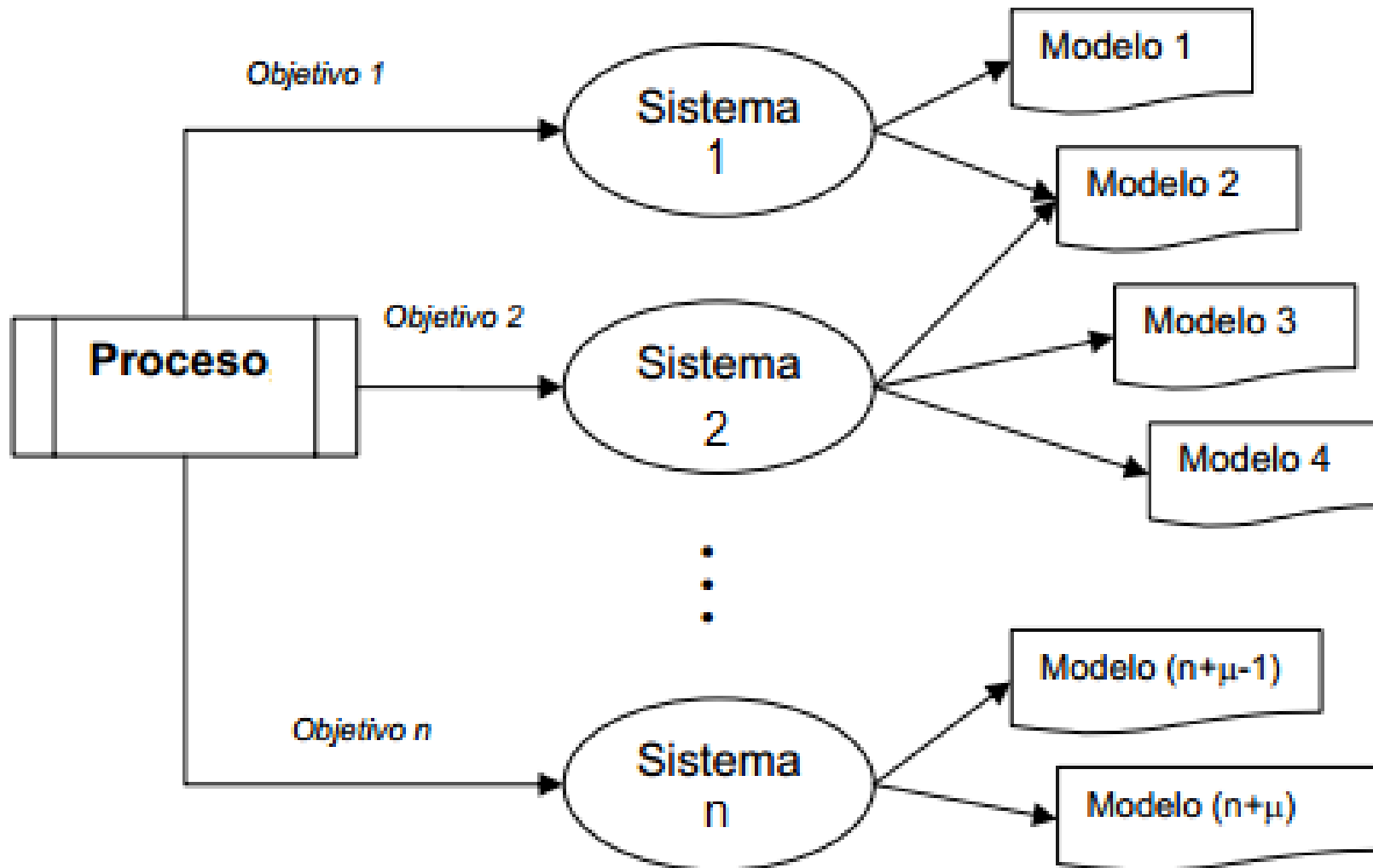
## Realimentación (Feedback)

*“The return back into a machine or system a part of what it produces, especially to improve what is produced” (Cambridge Dictionary)*

# Algunas definiciones básicas

- **Planta:** el objeto físico que tratamos de controlar, impactar, influenciar. En este curso estudiaremos como controlar el comportamiento de estas plantas.
- **Objetivo de Control:** qué queremos conseguir?
- **Entrada(s):** las señales que usamos para controlar una planta.
- **Salida(s):** las mediciones, datos, que están sensando u observando.
- **Proceso(s):** lo que está sucediendo dentro de la planta debido a las entradas.
- **Modelo:** abstracción matemática de lo que sucede en el sistema/proceso.
- **Perturbaciones:** señales de entrada que deterioran la planta o proceso y que no pueden ser directamente controladas y/o medidas.

# Algunas definiciones básicas



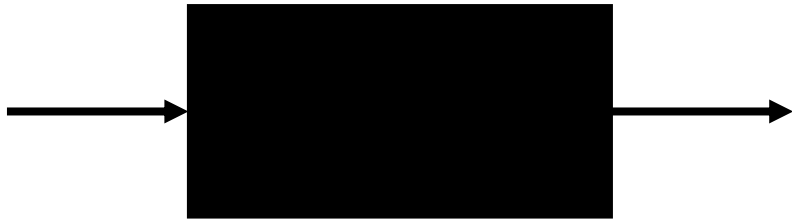
**Def. Sistema:** Un **sistema** es una abstracción de una realidad física **de acuerdo a los objetivos** de estudio planteados.

De esta forma, a un mismo proceso pueden asociarse varios sistemas, extrayendo un aspecto restringido de la realidad física completa según el objetivo.

# Tres tipos de modelos

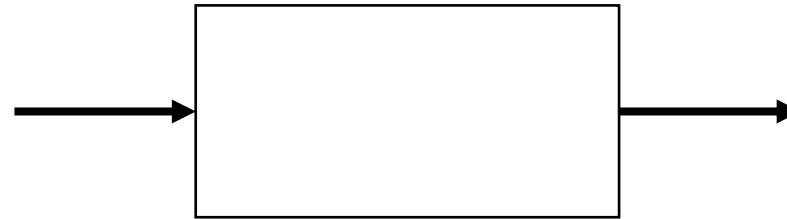
## (1) Modelos de caja negra

- Aprende por *entrenamiento* (empíricos)
- Se desconocen los procesos que suceden dentro del sistema
- Desventaja: difícil de analizar
- Ventaja: no se necesita una formulación analítica de la física.



## (2) Modelos de caja blanca

- Se construye un modelo matemático a partir de principios físicos.
- Las ecuaciones relacionan las entradas y salidas
- Ventajas? Desventajas?

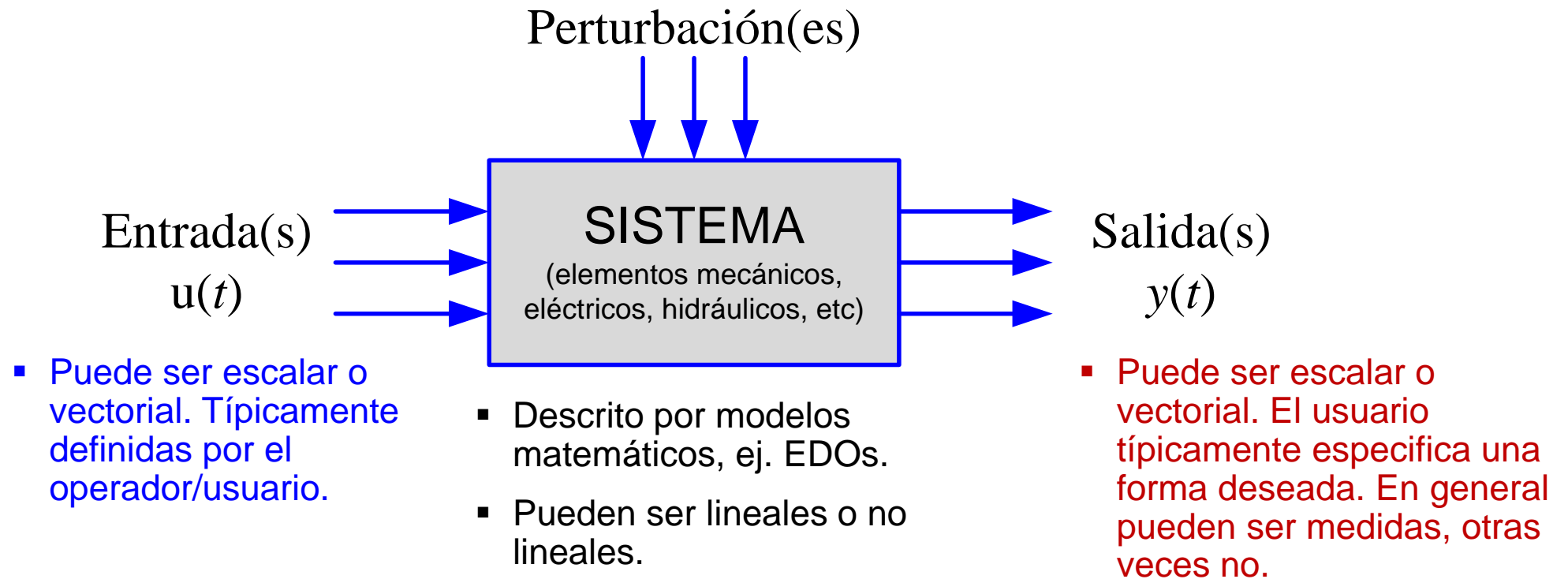


## (3) Modelos de caja gris

Incluyen modelos empíricos y analíticos

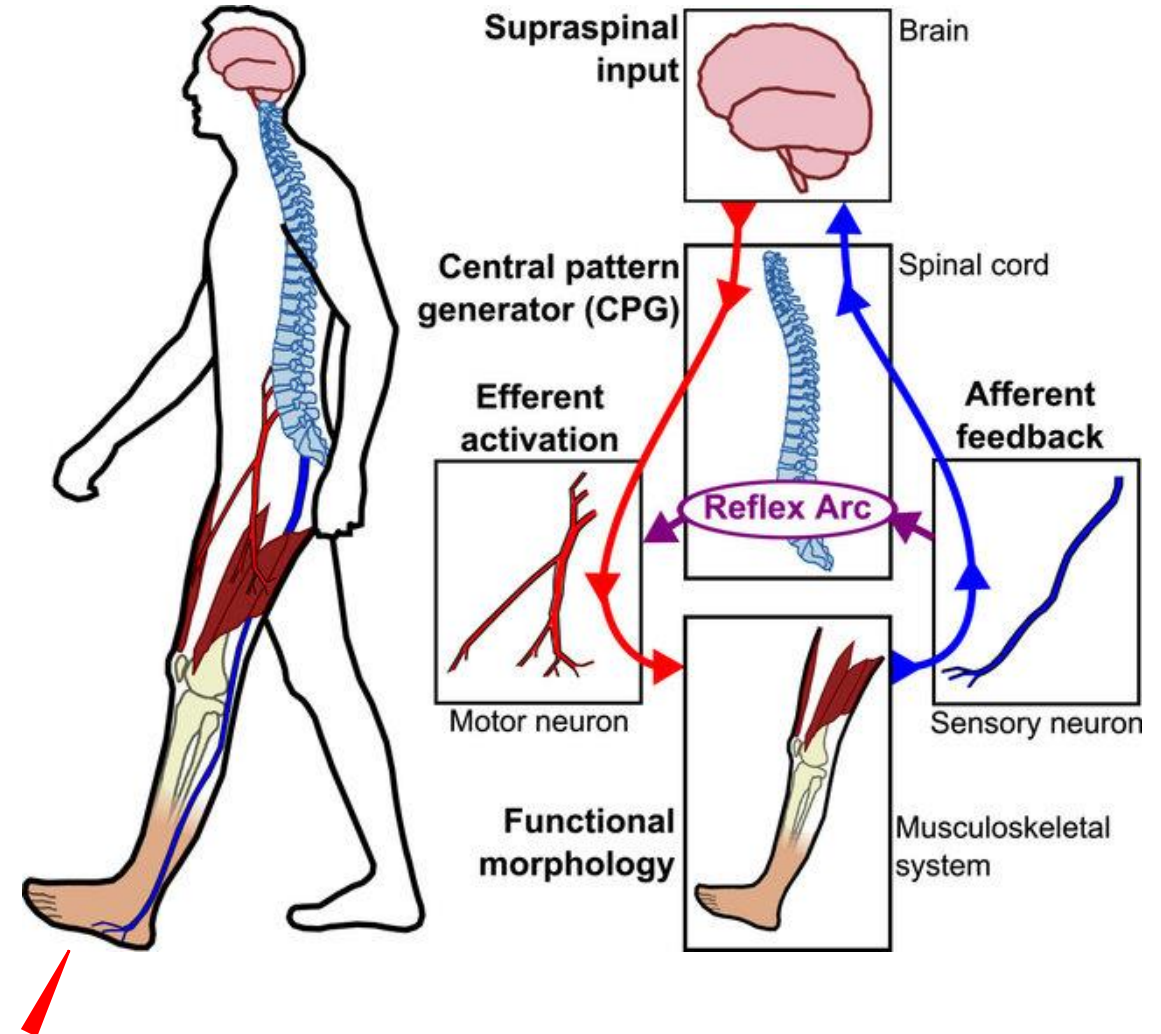
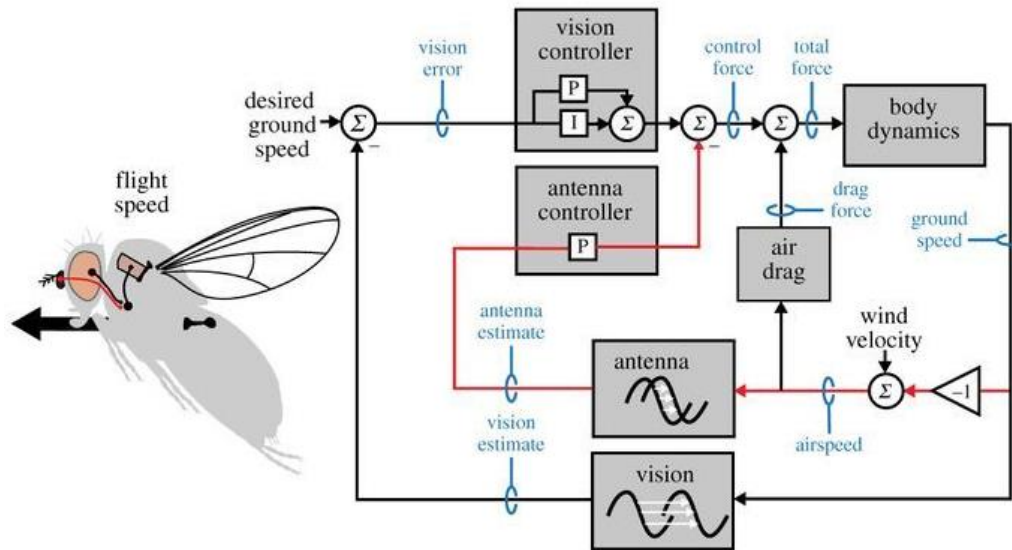
Dependiendo de los objetivos podremos tener mezclas de estos tipos de modelación.

# Qué es un Sistema de Control?



**Sistema de Control:** Un conjunto de dispositivos mecánicos, ópticos, electrónicos, ..., que permiten gestionar, comandar, dirigir, regular el comportamiento de otros dispositivos o sistemas para mantener una **salida deseada** (*set point*).

# Ejemplo 1: Sistemas Biológicos

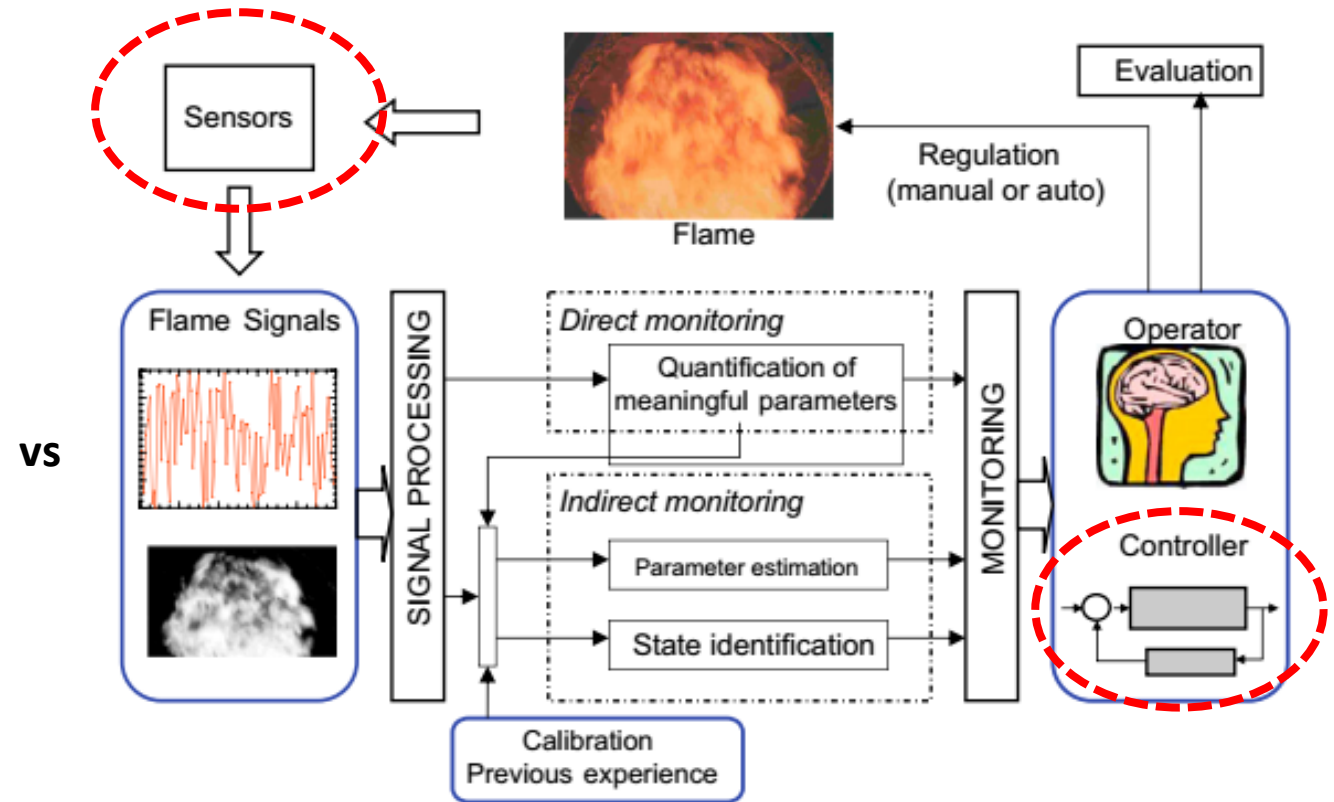




# Ejemplo 2: Procesos de Combustión



*The Simplest Form of Pyrometer*

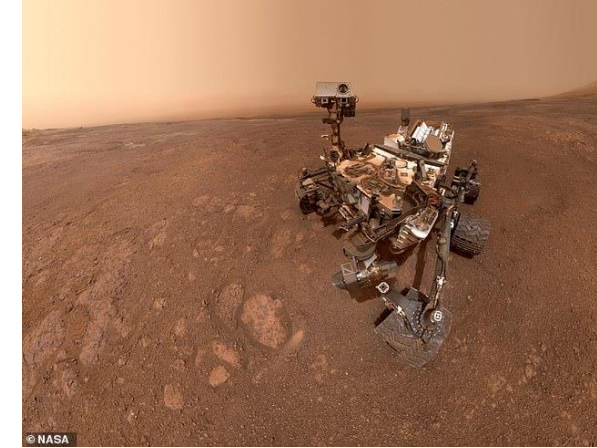




## Ejemplo 3: Control de Emisiones

[link](#)

## Ejemplo 4: En minería y metalurgia

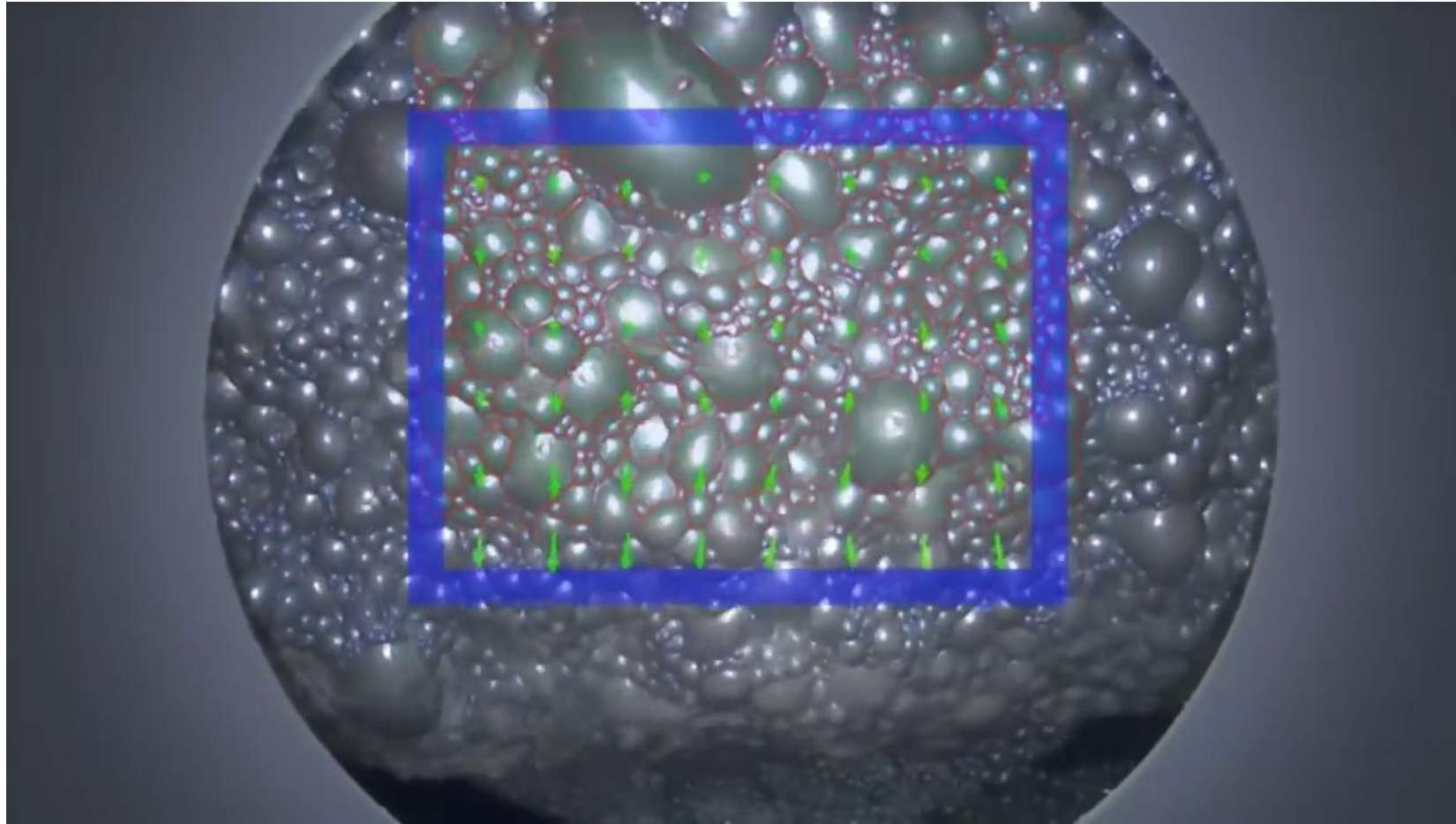


### ***Algunos ejemplos:***

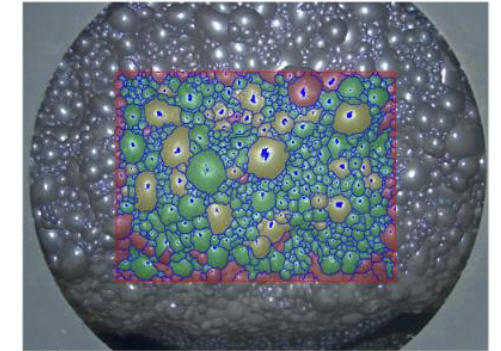
*Sistemas automatizados de despacho de camiones, automatización de chancadores, máquinas de cátodos robotizadas, instrumentación para análisis elemental y mineralógico en línea, sistemas de monitoreo de grandes equipos mineros para evaluar su condición (salud), camiones autónomos, sistemas de control en procesos de flotación basados en visión artificial, etc.*



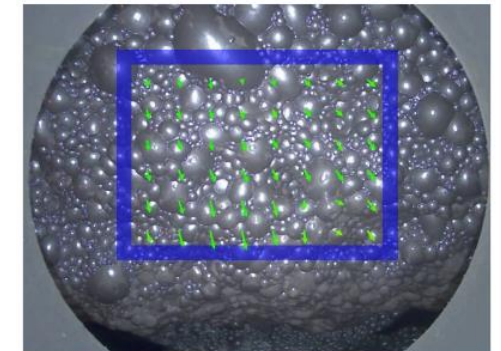
## Ejemplo 4.b: En minería y metalurgia



[Fuente](#)  
[Manual](#)



FrothSense camera image, with bubble size analysis.  
Green and yellow areas indicate the recognized complete bubbles.

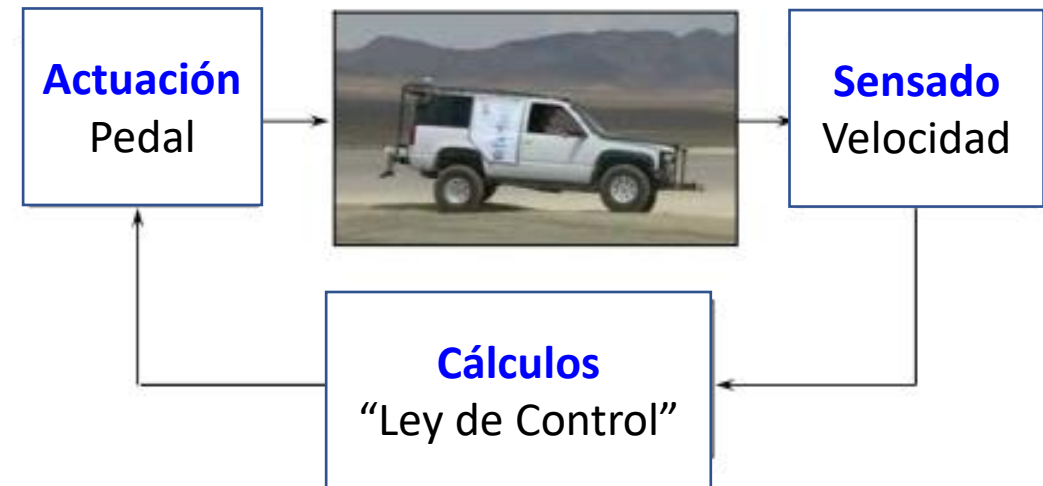
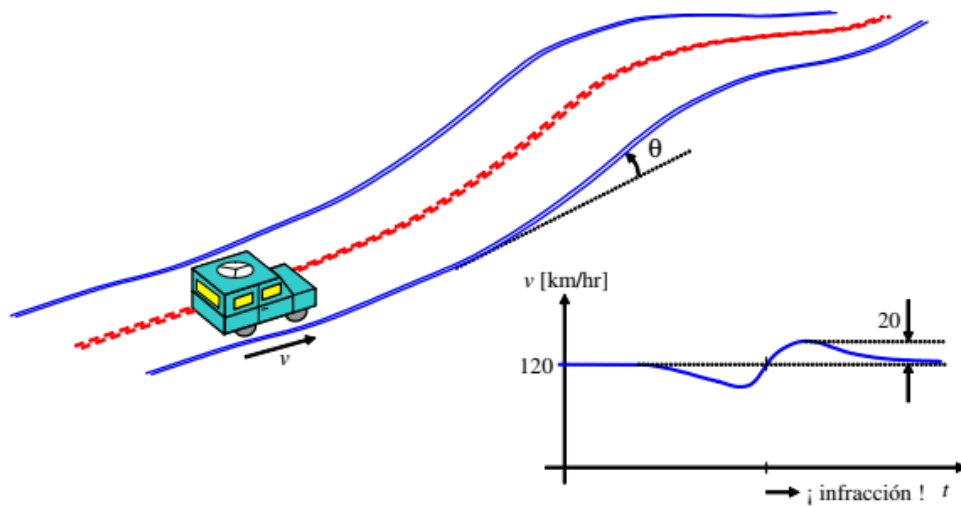


FrothSense camera image, with bubble speed analysis.  
Individual arrows indicate the speed and direction of the respective regions.

# Componentes de un Sistema de Control

## CONTROL = SENSADO + CÁLCULOS + ACTUACIÓN

*En un lazo realimentado*

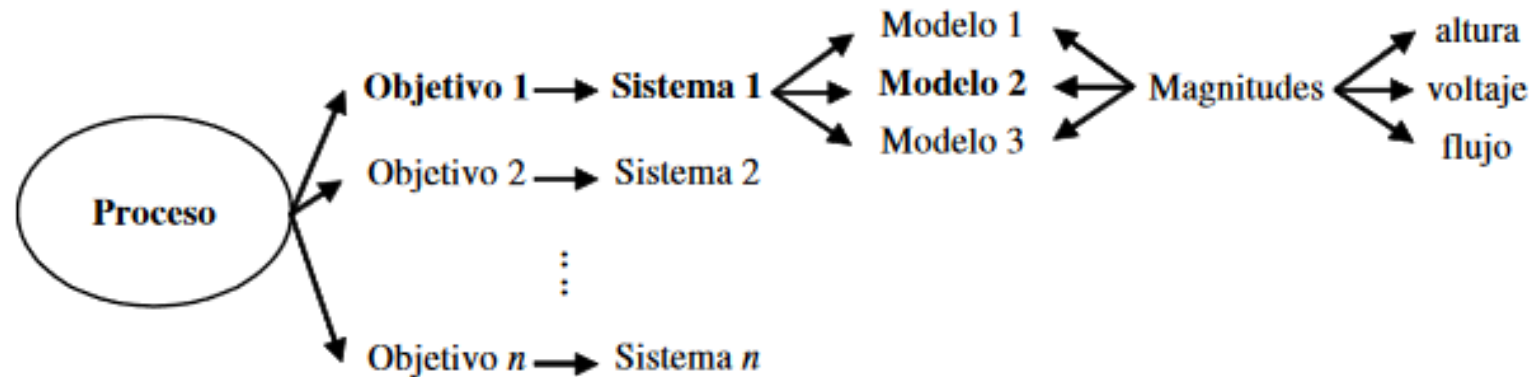


### Objetivos:

- **Estabilidad:** el sistema mantiene un punto de operación deseado (ej. mantiene una velocidad constante)
- **Desempeño:** el sistema responde rápidamente a cambios (ej. acelerar a 100km/hr)
- **Robustez:** el sistema tolera perturbaciones (ej. cambios en las propiedades del suelo)

# Componentes de un Sistema de Control

- ❑ **Señales:** Recordemos que una señal es una función matemática definida (continua o discreta) que representa la evolución de una magnitud de un proceso.



- ❑ En sistemas de control, las **señales de prueba** son útiles para caracterizarlos. Se aplican a la entrada para estudiar la respuesta en el plano del tiempo (y frecuencia), entre estas tenemos:

A. **Impulso**

B. **Escalón**

C. **Rampa**

D. otras

Por ahora veremos estas,  
ya que son las más usadas, en  
capítulos posteriores  
retomaremos este tópico.

# Componentes de un Sistema de Control

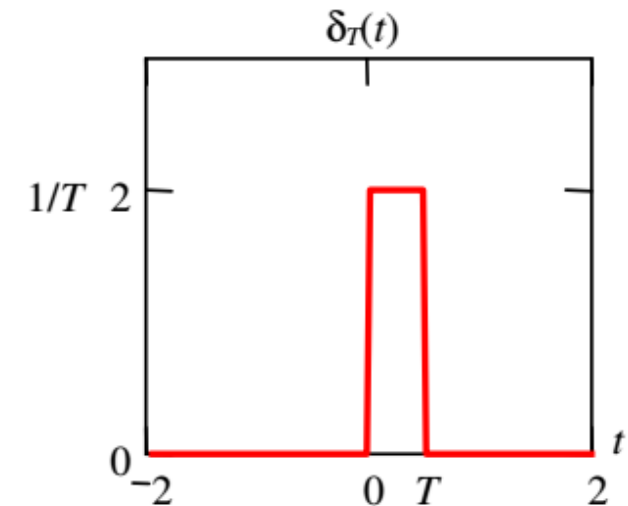
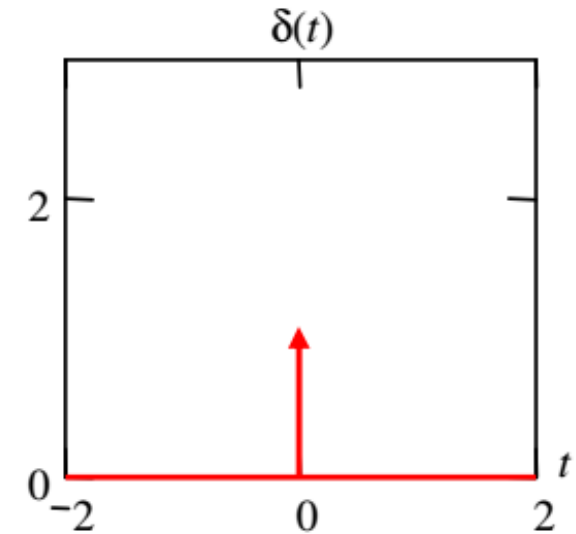
## A. Señal de entrada Impulso:

- El impulso  $\delta(t)$  en su forma continua, posee un valor no nulo en  $t = 0$  y área unitaria, i.e.:

$$\delta(t) = 0, \quad t \neq 0$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1$$

- En su forma discreta se puede definir como una señal con valor constante en un intervalo temporal pequeño, con la salvedad de que su área sea 1.



# Componentes de un Sistema de Control

## B. Señal de entrada Escalón:

- En su versión continua se puede definir como:

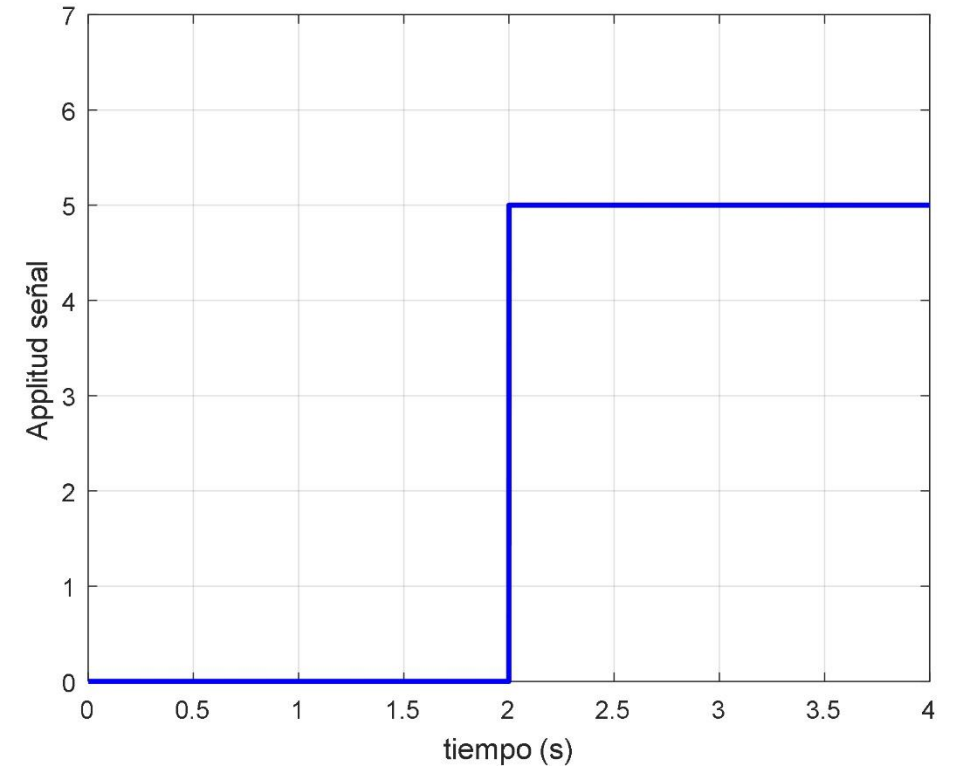
$$u(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t \geq 0 \end{cases}$$

- Por ejemplo, en su forma discreta puede ser generada el siguiente comando:

```
u = @(t) double(t>=0);
```

Ej: graficar la señal

$$5 \cdot u(t - 2)$$



```
t = 0:0.001:4;
plot(t, 5*u(t-2), '-b', 'LineWidth', 2);
xlabel('tiempo (s)');
ylabel('Applitud señal'); grid on;
axis([0 4 0 7]);
```



# Componentes de un Sistema de Control

## C. Señal de entrada Rampa:

- En su versión continua,  $r(t)$ , se obtiene integrando un escalón, existen varias definiciones, entre estas:

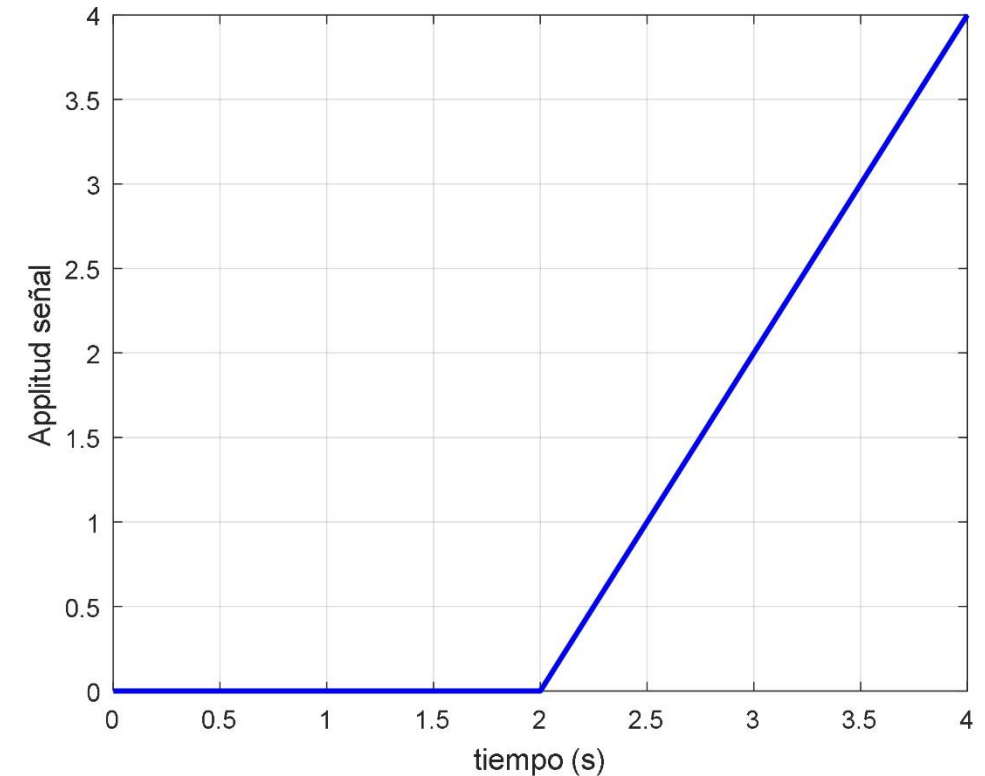
$$r(t) = \int_{-\infty}^t u(\tau) d\tau, \text{ ó } r(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ t & t \geq 0 \end{cases}, \text{ ó } r(t) = tu(t)$$

- Equivalentemente como para el escalón, la rampa puede generarse mediante el siguiente comando:

```
r = @(t) t.*double(t>=0);
```

Ej: graficar la señal

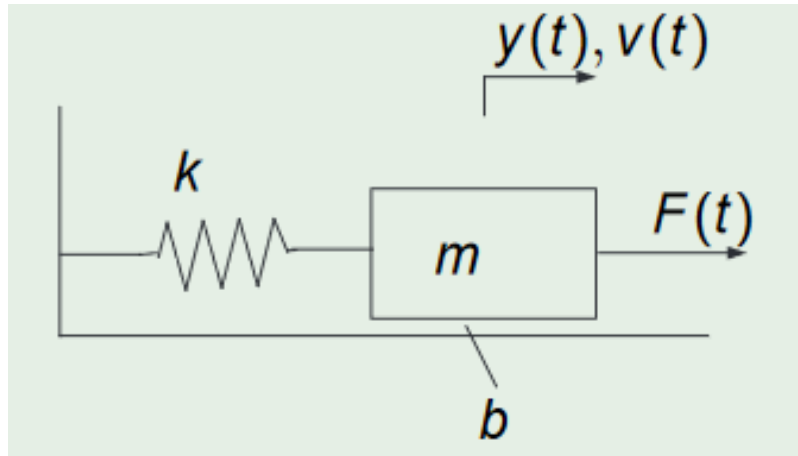
$$2 \cdot r(t - 2)$$



```
t = 0:0.001:4;
r = @(t) t.*double(t>=0);
plot(t, 2*r(t-2), '-b', 'LineWidth', 2);
xlabel('tiempo (s)');
ylabel('Amplitud señal'); grid on;
```

# Componentes de un Sistema de Control

## Ejemplo: Sistema estable o inestable?

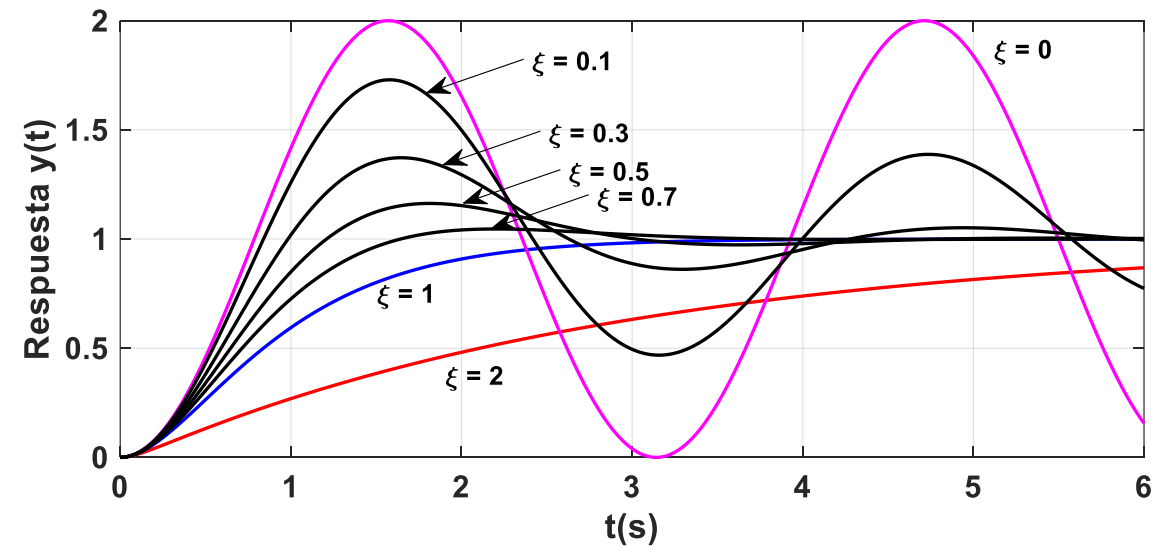
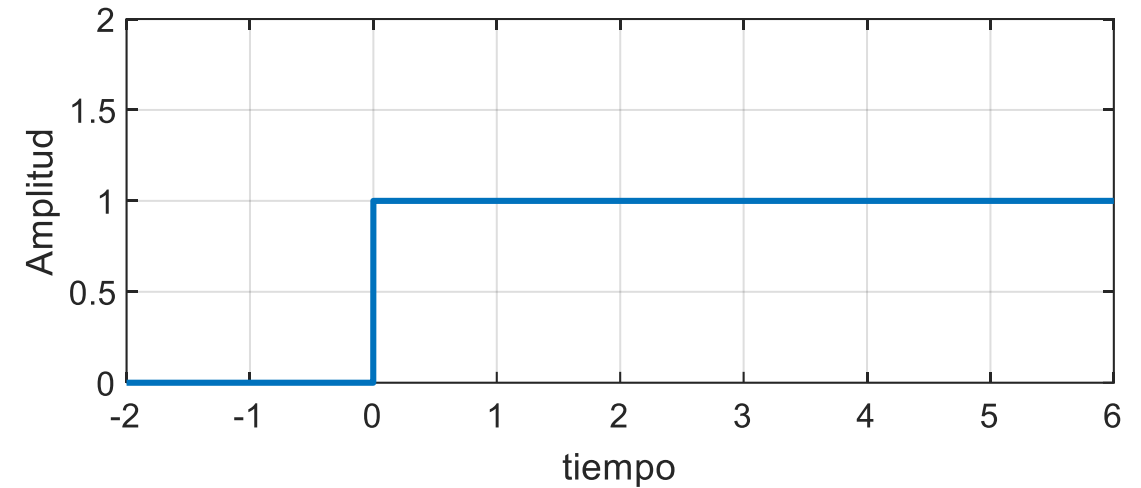


La ecuación de movimiento resulta de aplicar la 2da Ley de Newton:  $\Sigma F = F_{neta}$

$$\ddot{y}(t) + \frac{b}{m} \cdot \dot{y}(t) + \frac{k}{m} \cdot y(t) = \frac{F(t)}{m}$$

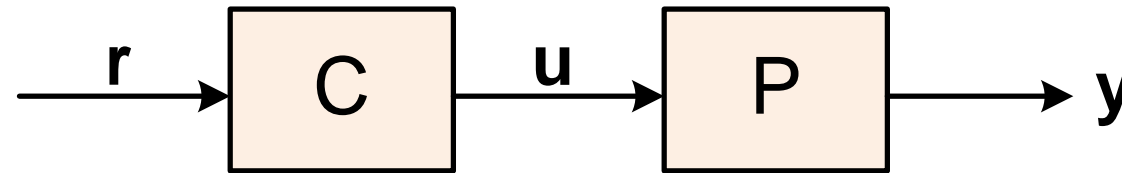
$$\ddot{y}(t) + a_1 \dot{y}(t) + a_2 y(t) = b_0 u(t)$$

$$\ddot{y}(t) + 2\xi\omega_n \cdot \dot{y}(t) + \omega_n^2 \cdot y(t) = \omega_n^2 k \cdot u(t)$$

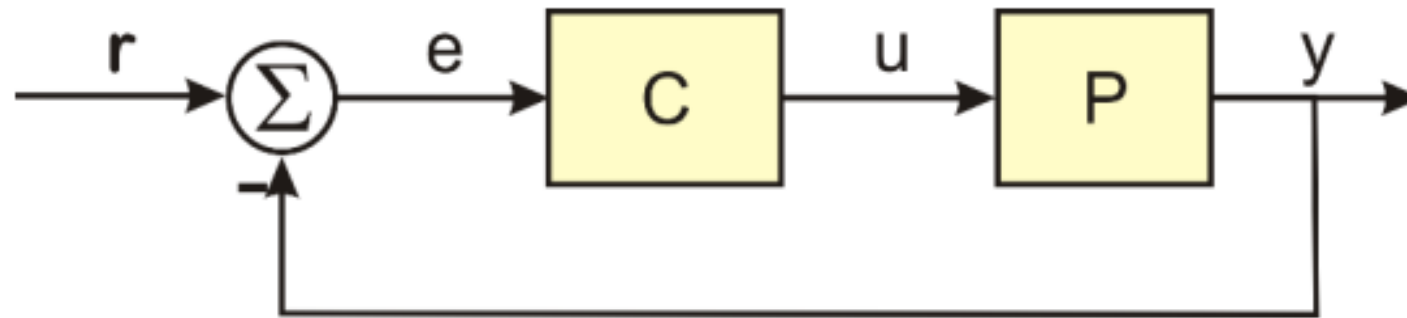


# Dos clases de estrategias de control basadas en modelos

- I. Estrategia de control en Lazo Abierto (L.A.)
- II. Estrategia de control en Lazo Cerrado (L.C.)

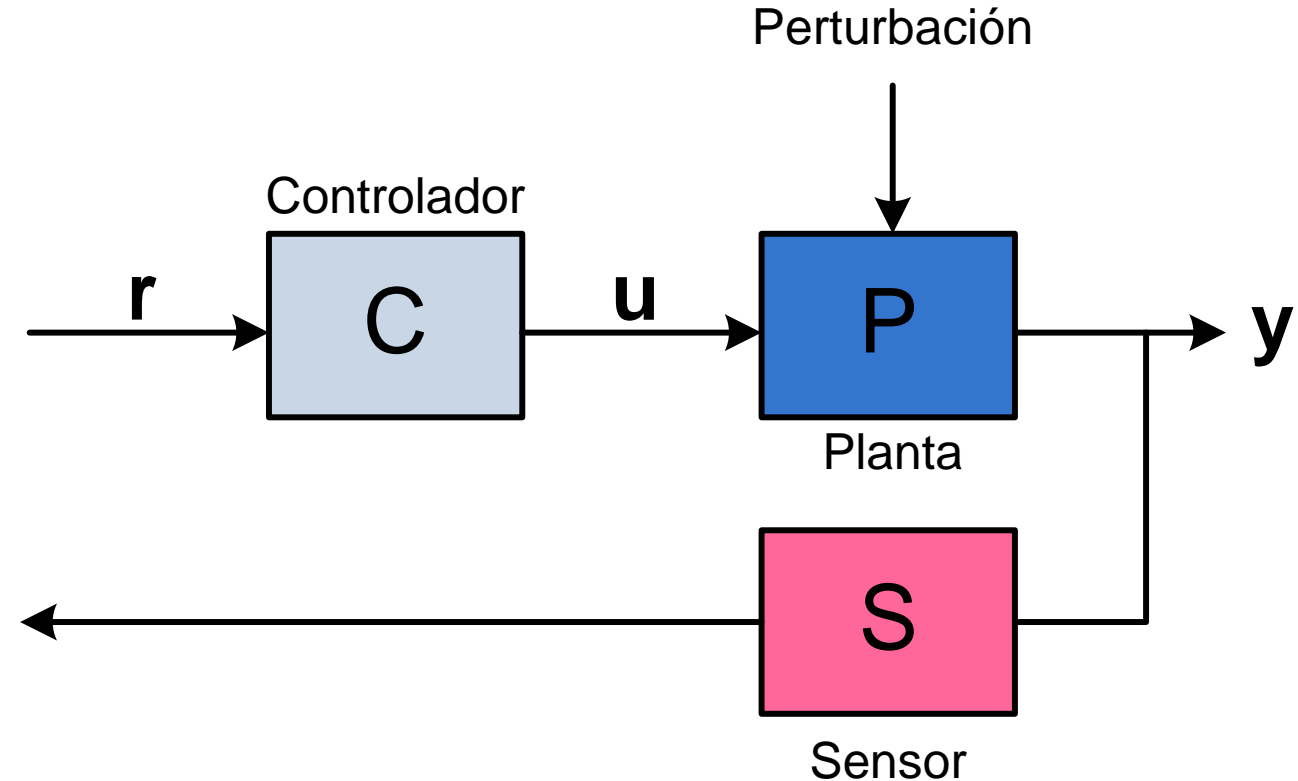


v/s



# Sistema de Control en Lazo Abierto

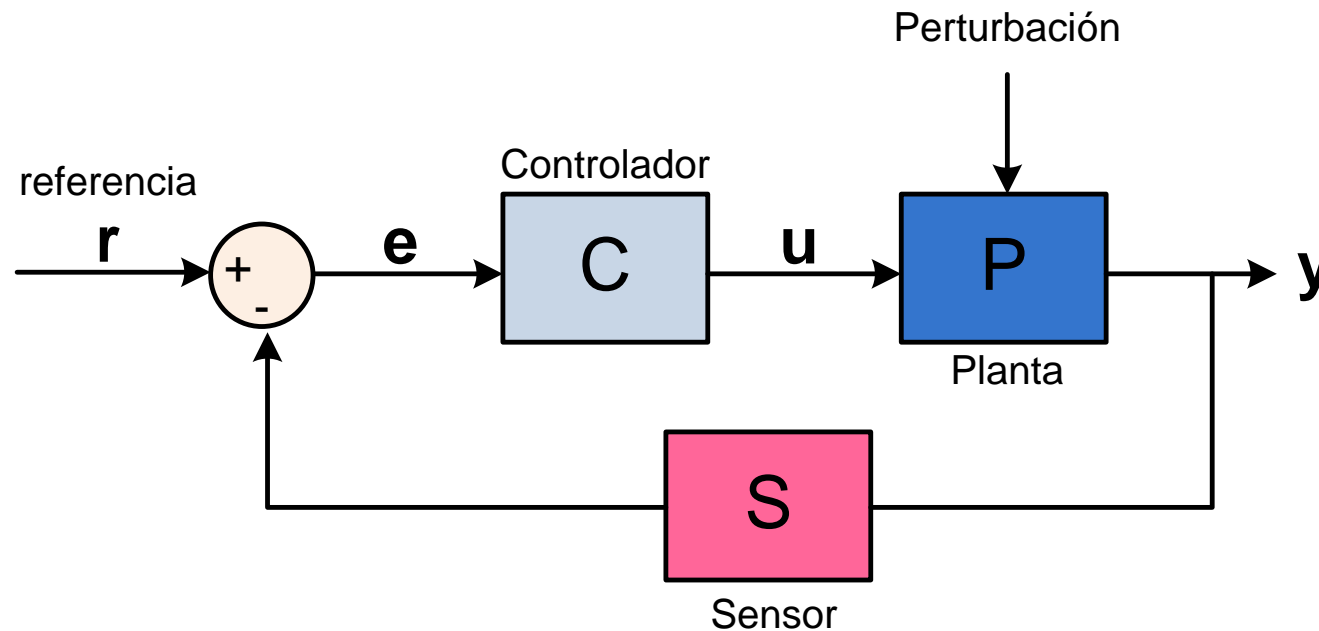
- El controlador determina la entrada de la planta sin *mirar* a la salida.
- En general el operador ajusta la entrada para mantener la salida lo más cercana posible a un valor deseado (cómo lo hace?).
- La salida o no es medida o retroalimentada para compararse con la entrada.
- Esta estrategia es solo usada si se tiene un modelo/calibración exactos del sistema.
- En presencia de perturbaciones el sistema no desempeñará la tarea deseada.
- En un sistema en L.A. no siempre existe un sensor.
- Ejemplos: tostador, luces tráfico, hornos a gas.



**OJO: El hecho de que existan sensores en el sistema NO lo convierte en un lazo cerrado.**

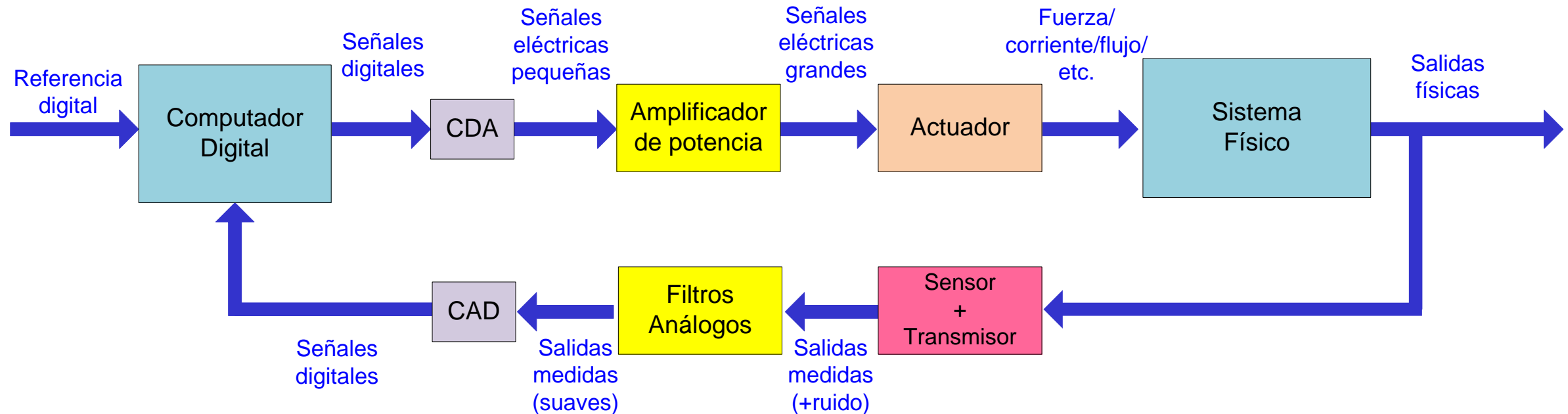
# Sistema de Control en Lazo Cerrado (realimentado)

- El controlador determina la entrada a la planta basado en la salida que esta produce.
- **Robusto** a perturbaciones externas e internas.
- El controlador recibe la señal de error, luego genera un valor de entrada a la planta, cerrando el lazo.
- Puede estabilizar el sistema (si este es inestable). Control en L.A. no puede ser usado en este caso.
- Ej. Aire acondicionado, refrigeradores.



# Sistema de Control en Lazo Cerrado

- En la práctica, el diagrama en bloques anterior contiene muchos más elementos:

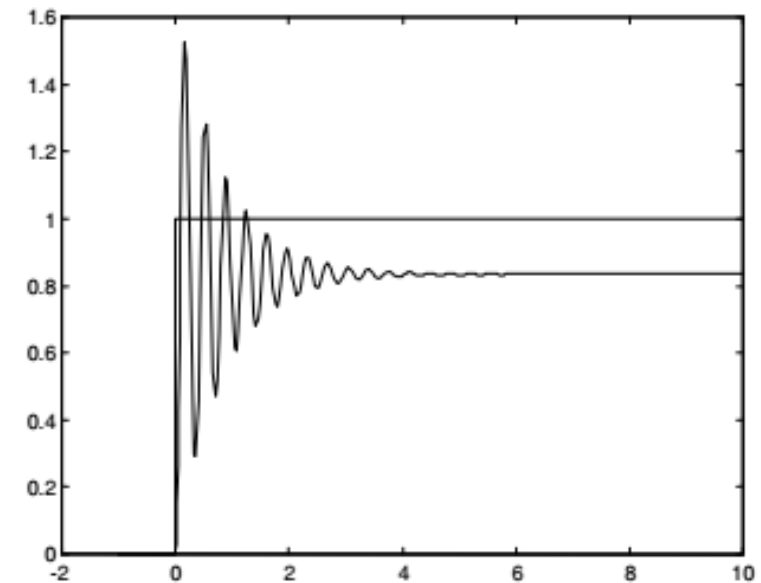
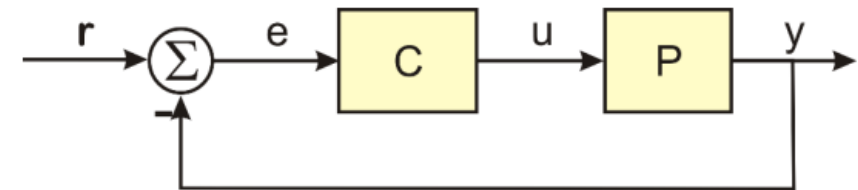
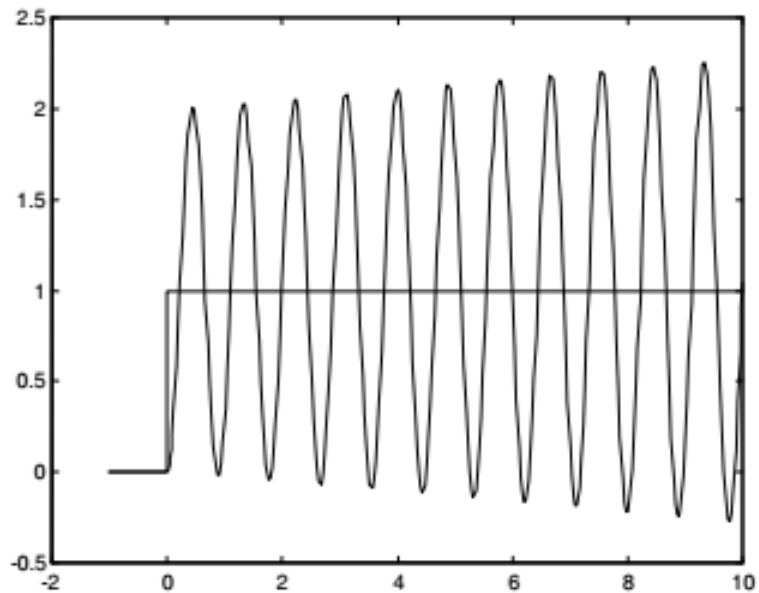
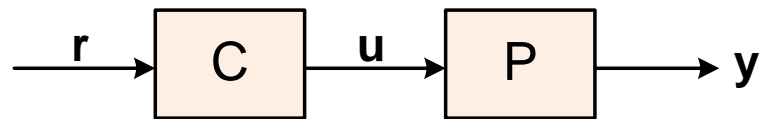


CDA: Conversor Análogo Digital

CAD: Conversor Digital Análogo

# Sistema de Control en Lazo Cerrado

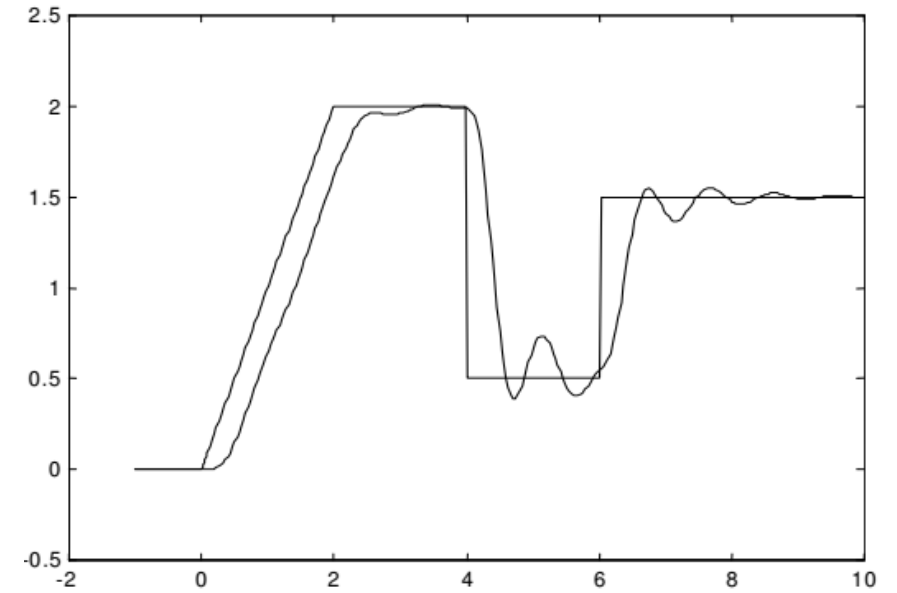
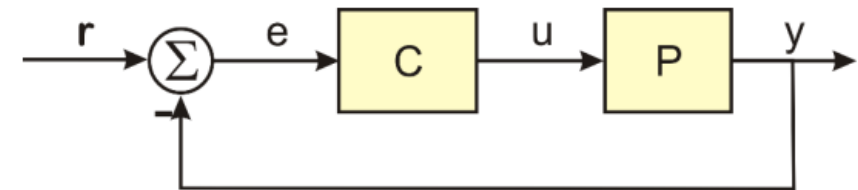
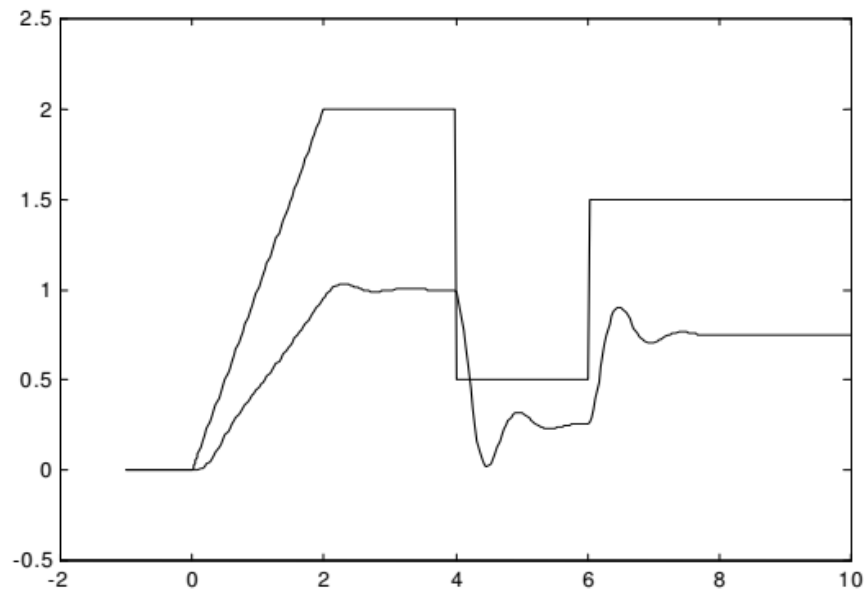
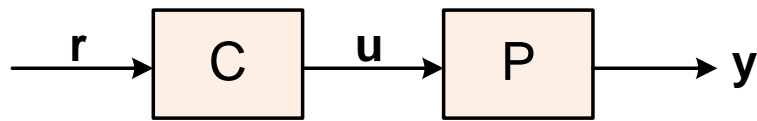
*El objetivo en el caso de tener un sistema inestable, será estabilizarlo usando realimentación*





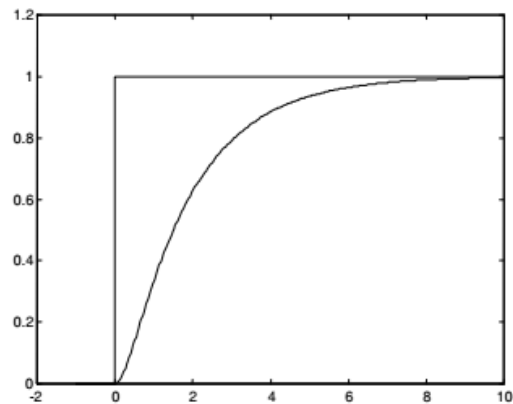
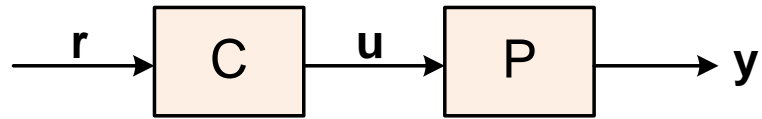
# Sistema de Control en Lazo Cerrado

**Otro objetivo al realimentar será tener un seguimiento efectivo de la señal de referencia o set point.**

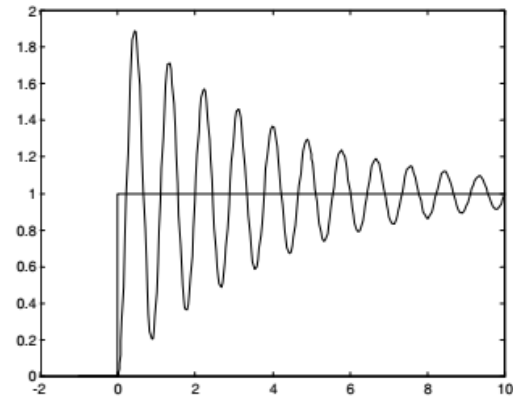


# Sistema de Control en Lazo Cerrado

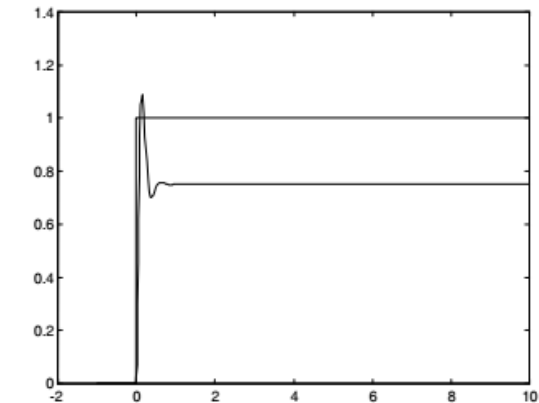
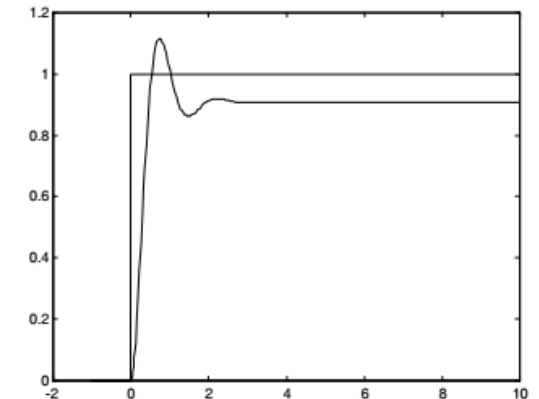
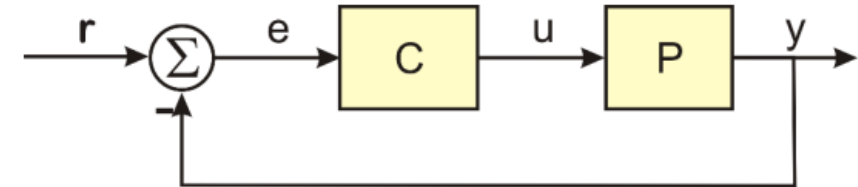
*Otro objetivo al realimentar será tener una respuesta transitoria adecuada.*



Respuesta transitoria  
suficientemente rápida

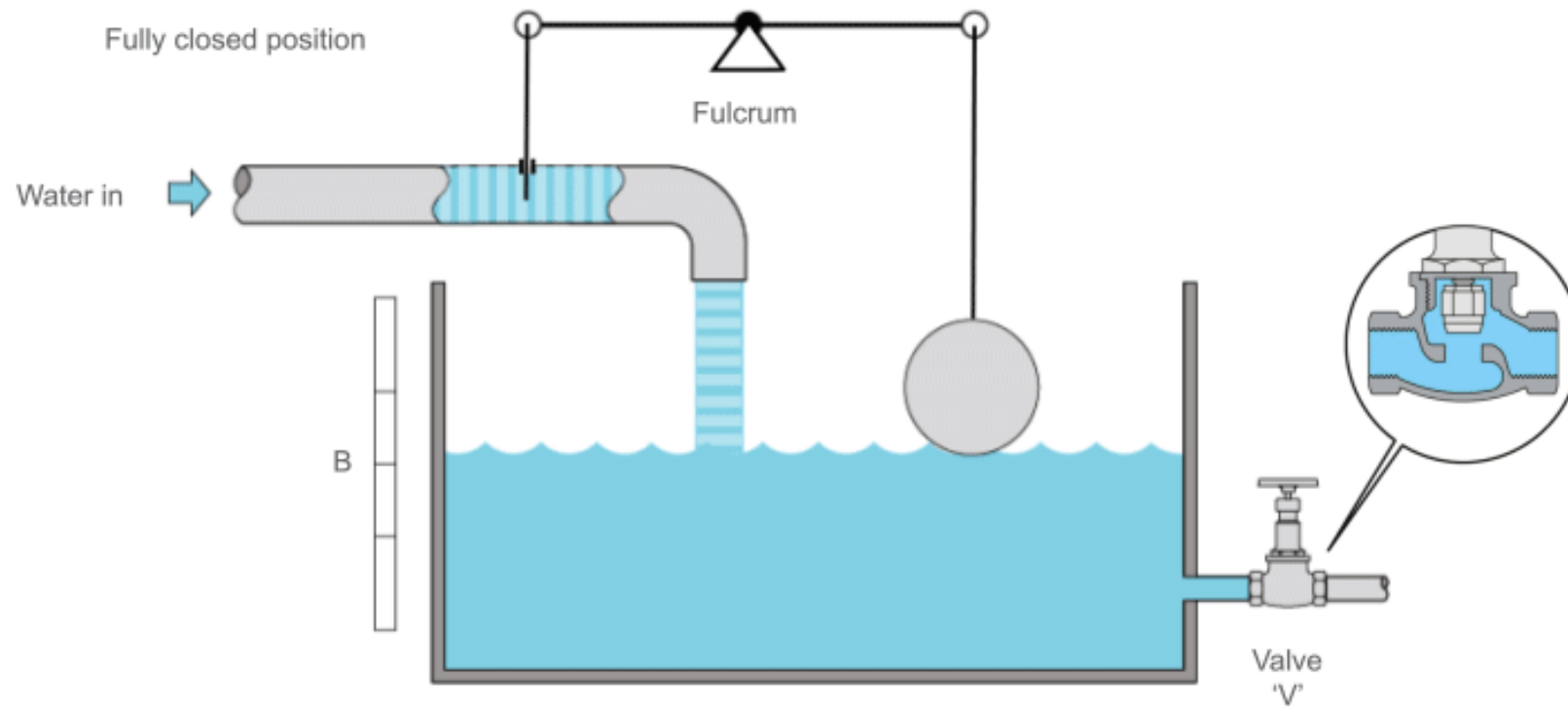


Respuesta transitoria  
con un amortiguamiento adecuado



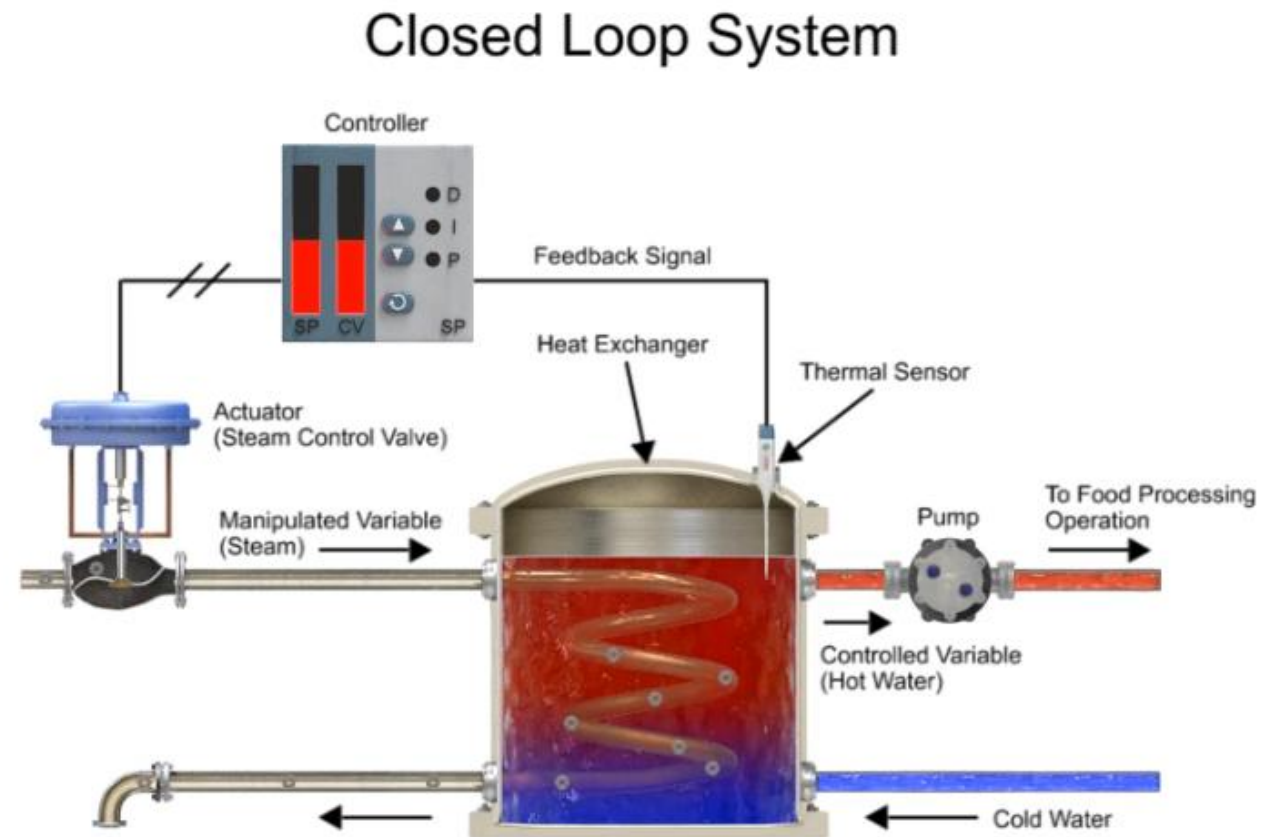
# Ejemplos estrategia L.C.

- Control de nivel en un estanque



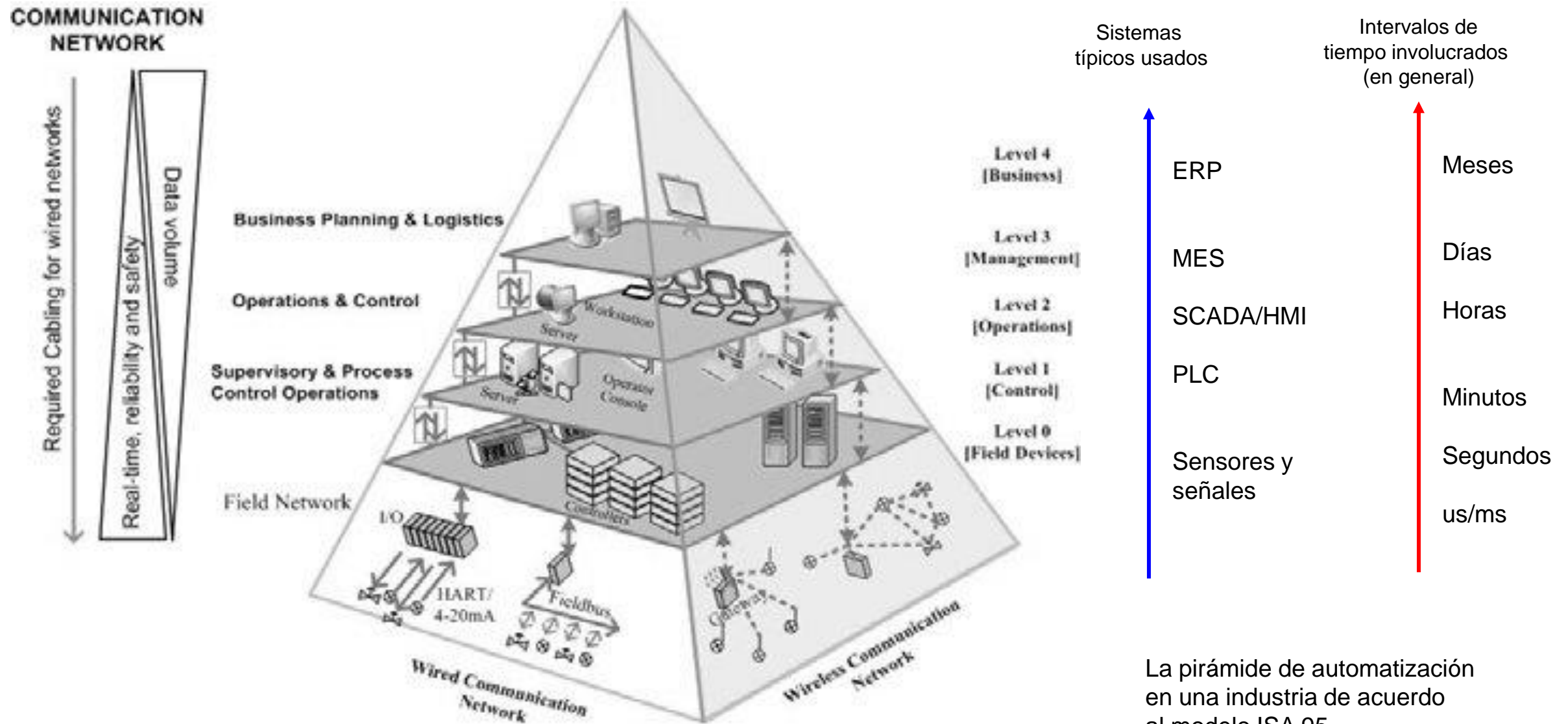
# Ejemplos

- Control de temperatura en L.C.



[Reproducir en youtube](#)

# A nivel industrial



# En este Curso

## Modelación

- EDOs, Transformada de Laplace, Funciones de Transferencia, Diagramas de bloques, Linealización. Identificación de sistemas.

## Análisis

- Sistemas de 1er y 2do orden, Respuesta en el tiempo, estado estacionario y transiente, respuesta en frecuencia, diagramas de bode, análisis de estabilidad.

## Diseño

- Lugar geométrico de las raíces, espacio de estados, diseño de controladores.



# Algunas lecturas de interés

JOM, Vol. 71, No. 2, 2019  
<https://doi.org/10.1007/s11837-018-03316-4>  
 © 2019 The Minerals, Metals & Materials Society



## The Changing World

On the face of it, the metallurgical industry looks stronger than at any time in its development. Primary metal production is at record levels, and continues to expand in response to significant population and consumption growth. The rapid technological changes that are currently underway are creating new markets for metals.

The industry response to this demand will be increased investment in exploration and the discovery of new primary sources in the form of ore bodies. However, we can expect that as these finite sources

development of new advanced materials and manufacturing technologies, creating opportunities for new industries in a diverse range of engineering applications. The advent of computerization and new technologies for energy generation and storage are already stimulating the need for new process technologies to produce a wide range of metallic elements—elements that, even in the recent past, have been regarded as being of no more than intellectual or academic interest.

Although small in volume, these are high value products, critical for the



Peter Hayes

## 01 Automatización en minería: El futuro es ahora

01

ABR

00\_Para abrir\_Sandvik

El incremento de la productividad y el fortalecimiento de la seguridad representan unas de las principales ventajas de la automatización en la industria minera.

El futuro del sector apunta a que la actividad sea cada vez más automatizada. Para implementar estas estrategias y cosechar sus frutos, es necesario generar una cultura organizacional que conciba esta alternativa como el eje rector de sus procesos. Un convencimiento y una decisión que debe nacer y ser internalizada por cada compañía.

La incorporación de tecnología, pasar de una operación manual a una automática, implica una mayor especialización de los trabajadores, como también una oportunidad para el desarrollo de sus competencias.

Alejandro Pavez V.

Periodista Revista Construcción Minera.

La actividad minera es una de las más antiguas del mundo, qué duda cabe. Su desarrollo se ha forjado paralelamente junto con la historia y la evolución cognitiva del ser humano, en una continuidad que hoy pareciera traspasar los límites de la misma Tierra, mirando las estrellas. No obstante, más allá de eso, lo cierto es que la minería pasó de ser un proceso centrado netamente en el trabajo físico, a una industria intensiva en el uso de grandes máquinas, que hoy se abre paso a la aplicación más concreta del conocimiento y la tecnología. ¿El fin? Mejorar los índices de productividad y seguridad de las faenas y ser cada vez más

PAPEL DIGITAL



Powered by ISSUU Publish for Free

## Hacia una minería 4.0

Recomendaciones para impulsar una industria nacional inteligente

