

# 2. Principios de Realimentación

## Panorama

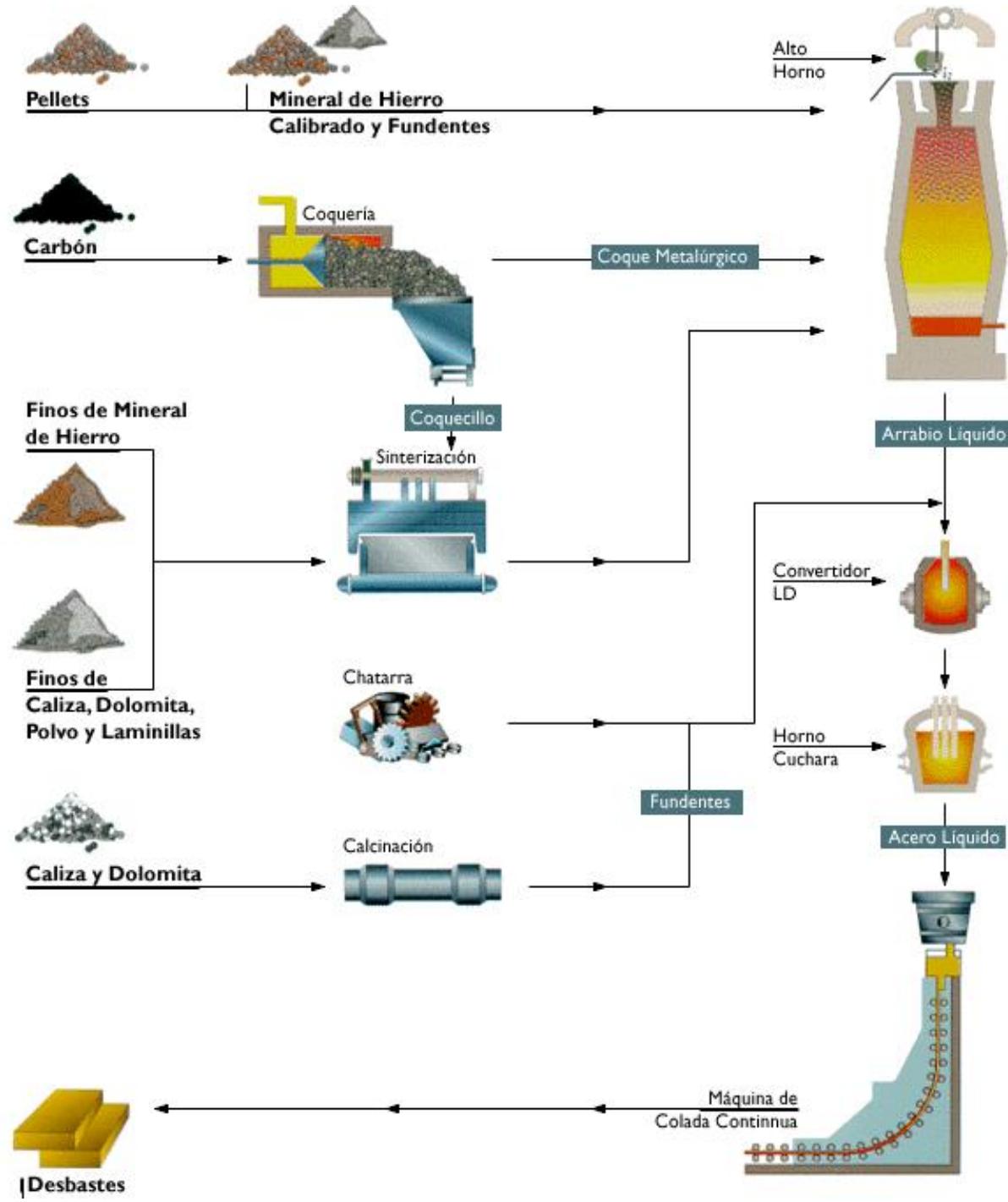
- Un ejemplo industrial motivador
- Formulación básica del problema de control
- La idea de *inversión* en la solución de problemas de control
- De lazo abierto a lazo cerrado

En este capítulo veremos que la **realimentación** es la herramienta clave que usan los ingenieros en control para modificar el comportamiento de un sistema y así satisfacer las especificaciones de diseño deseadas.

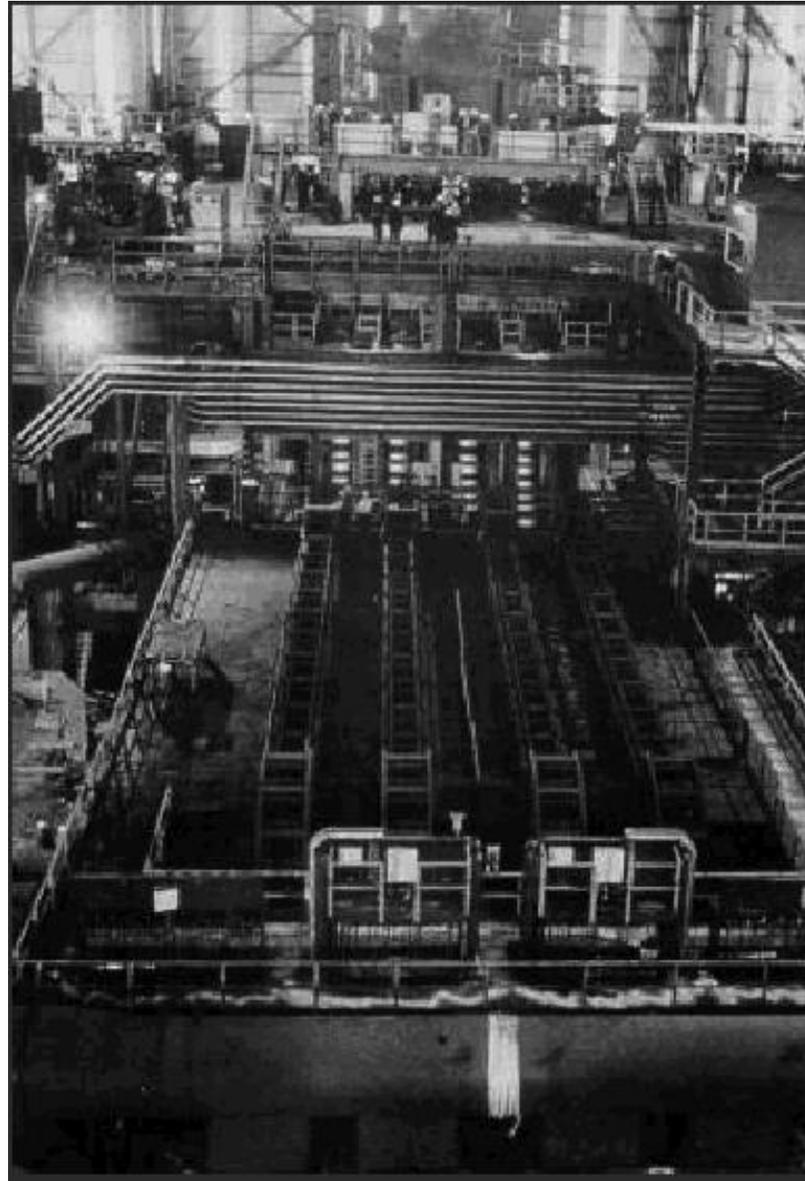
# Un ejemplo industrial: proceso de colada continua

Presentamos un ejemplo de un problema de control industrial que, aunque simplificado, es esencialmente un problema real auténtico.

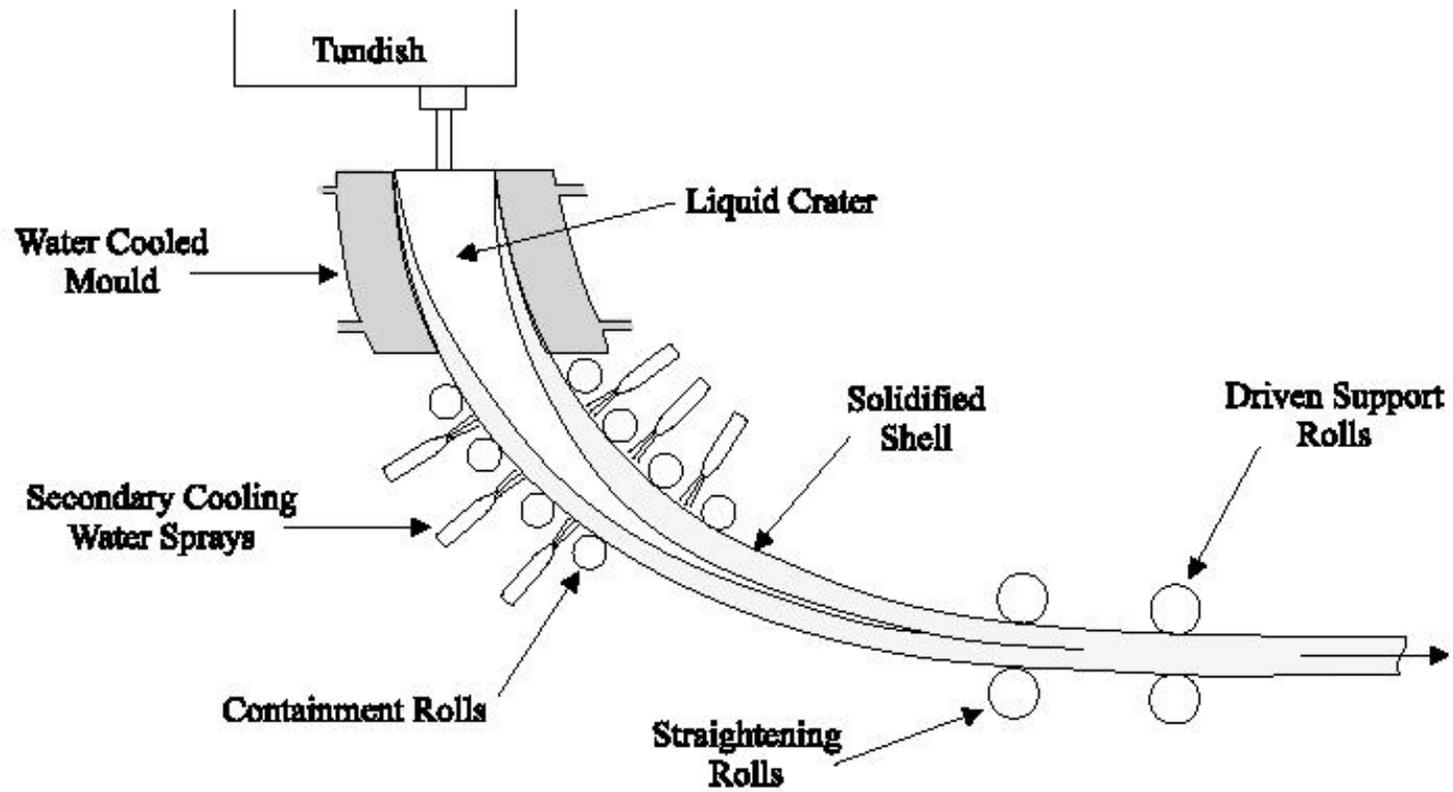
Este ejemplo, de un proceso de *colada continua*, pertenece a la industria siderúrgica. Sin embargo, como veremos, los principales elementos en la especificación de un comportamiento deseado, el modelado, y la necesidad de dar soluciones de compromiso, son comunes a los problemas de control en general.



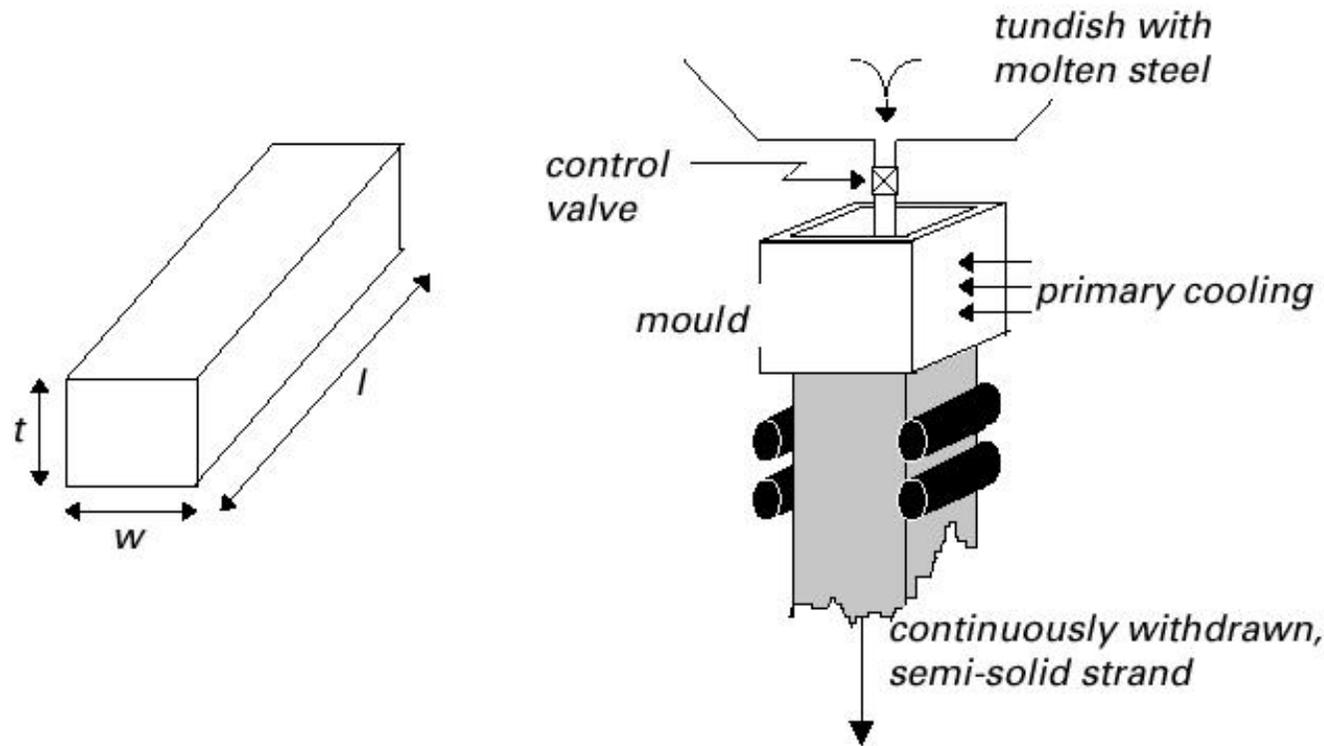
Parte del proceso integrado de producción de acero de SIDERAR.



Máquina industrial de colada continua (BHP Newcastle, Au.)

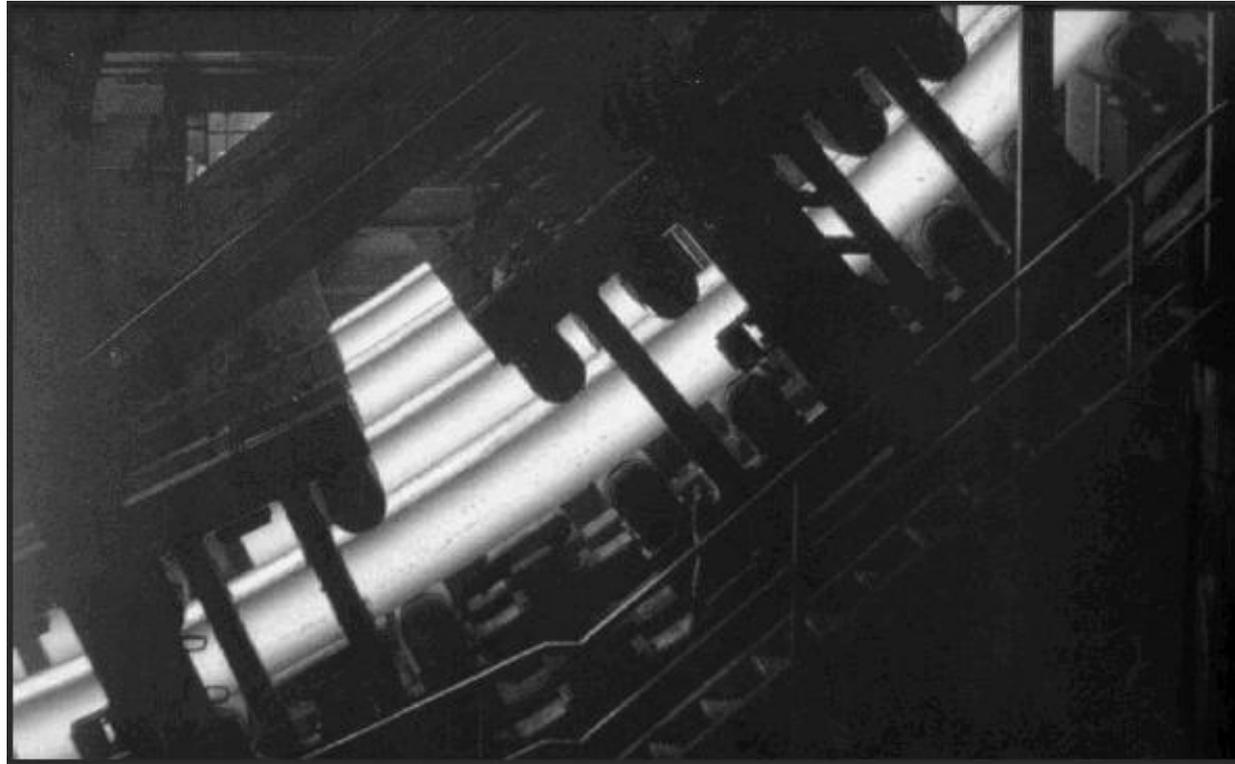


Esquema del proceso industrial de colada continua.



Colada continua: Planchón típico (izquierda) y diagrama simplificado (derecha).

Por ejemplo, los planchones producidos en SIDERAR son de 176/180 mm de espesor ( $t$ ), 560/1525 mm de ancho ( $w$ ), y 5780 mm de longitud máxima ( $l$ ).



Debastes colados; cámara secundaria de enfriamiento.

# Especificaciones de desempeño

Las metas principales de diseño para este problema son:

- *Seguridad:* Claramente, el nivel del molde nunca debe correr riesgo de derramarse o vaciarse, ya que cualquiera de las dos situaciones implicaría derramamiento de metal fundido, con consecuencias desastrosas.
- *Rentabilidad:* Los aspectos relevantes incluyen:
  - Calidad del producto
  - Mantenimiento
  - Rendimiento

# Modelado

Para seguir adelante con el diseño del sistema de control se necesita en primer lugar entender el proceso. Típicamente, el conocimiento del proceso se cristaliza en la forma de un **modelo matemático**.

Variables relevantes del proceso:

$h^*$  : nivel de acero de referencia en el molde

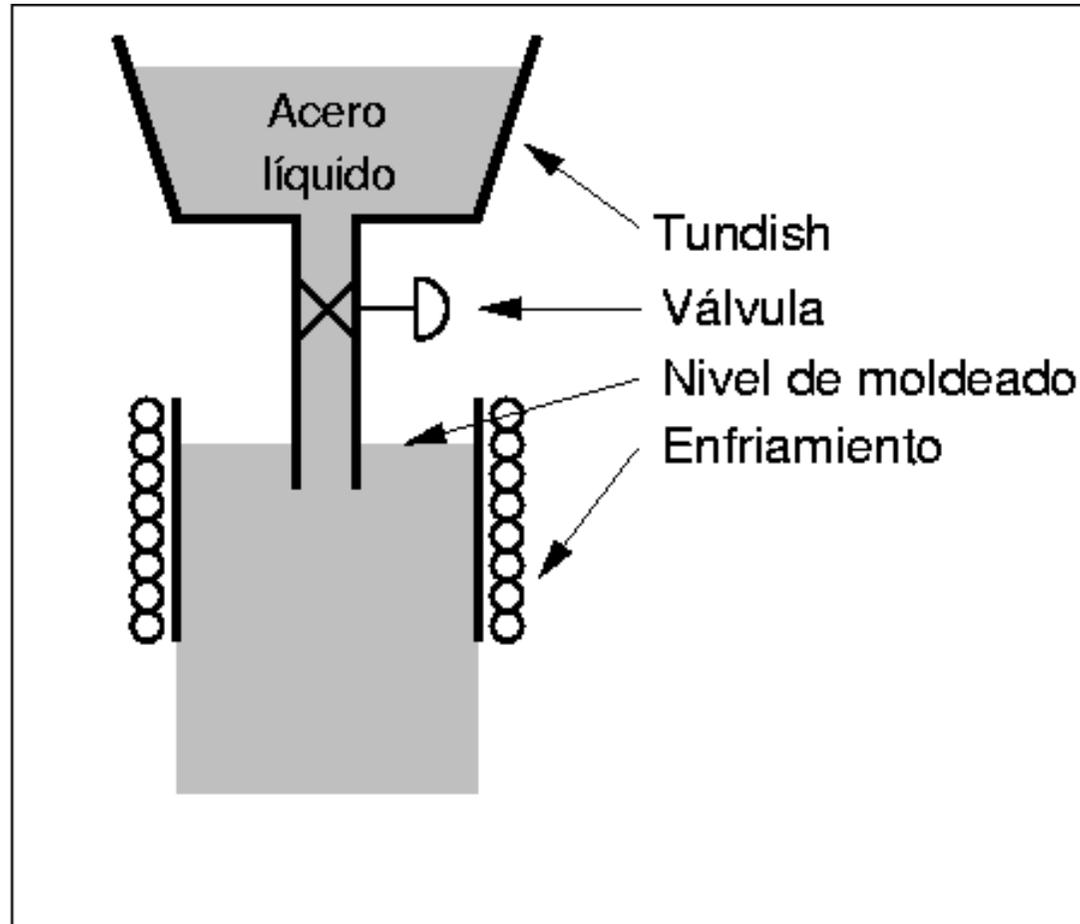
$h(t)$  : nivel real de acero en el molde

$v(t)$  : posición de la válvula

$\sigma(t)$  : velocidad de colado

$q_{in}(t)$  : caudal de material entrante al molde

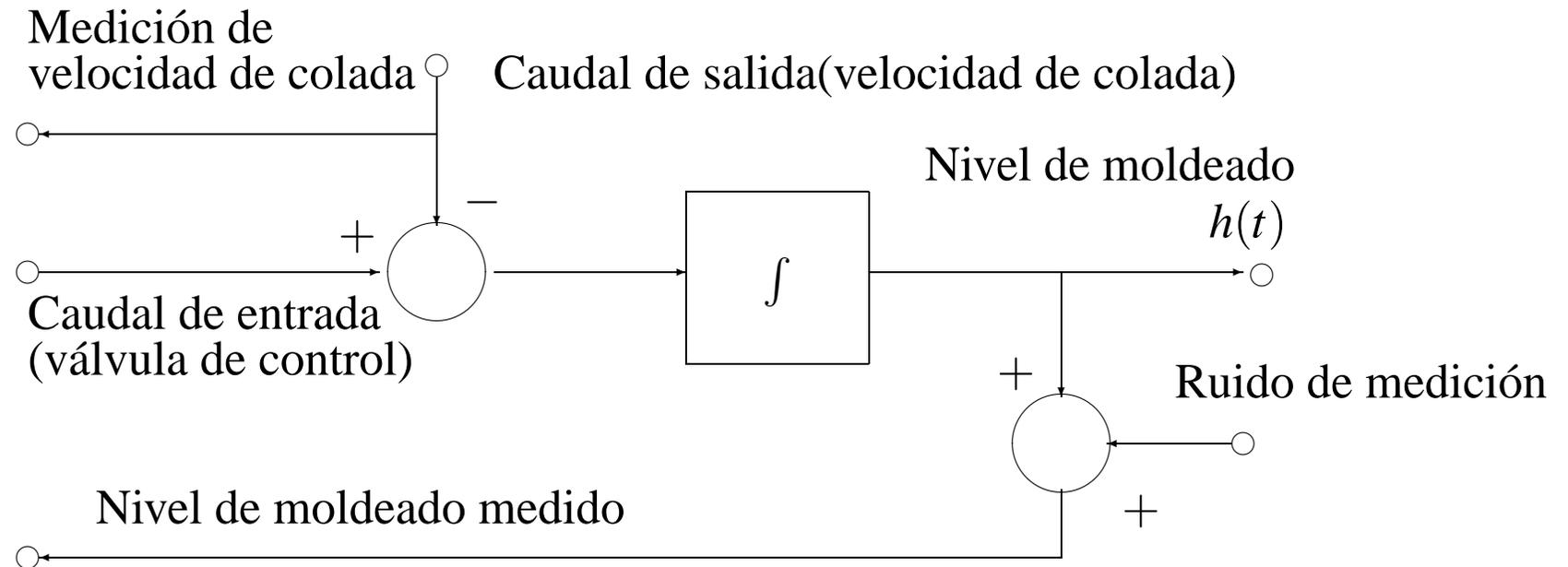
$q_{out}(t)$  : caudal de material saliente del molde



Modelo simple como tanque

$$h(t) = \int_{-\infty}^t (q_{in}(\tau) - q_{out}(\tau)) d\tau$$

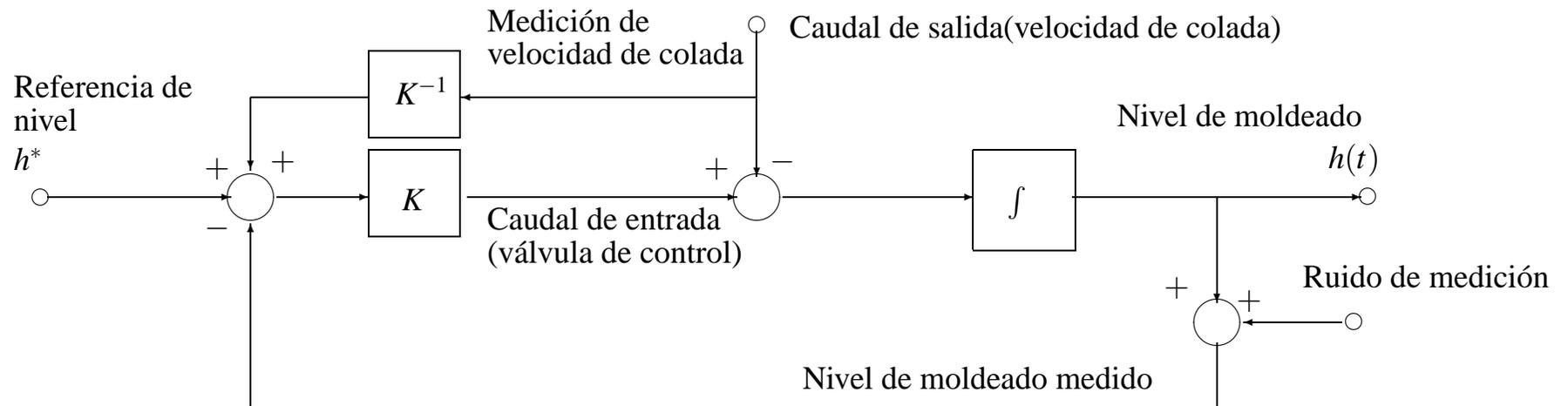
# Diagrama de bloques de la dinámica simplificada del proceso de colada continua, sensores y actuadores.



# Realimentación y predicción

Veremos más adelante que la idea central en control es la de **inversión**. Por otra parte, convenientemente, la inversión puede lograrse a través de dos mecanismos básicos: **realimentación y predicción**.

Estrategia de control sugerida:

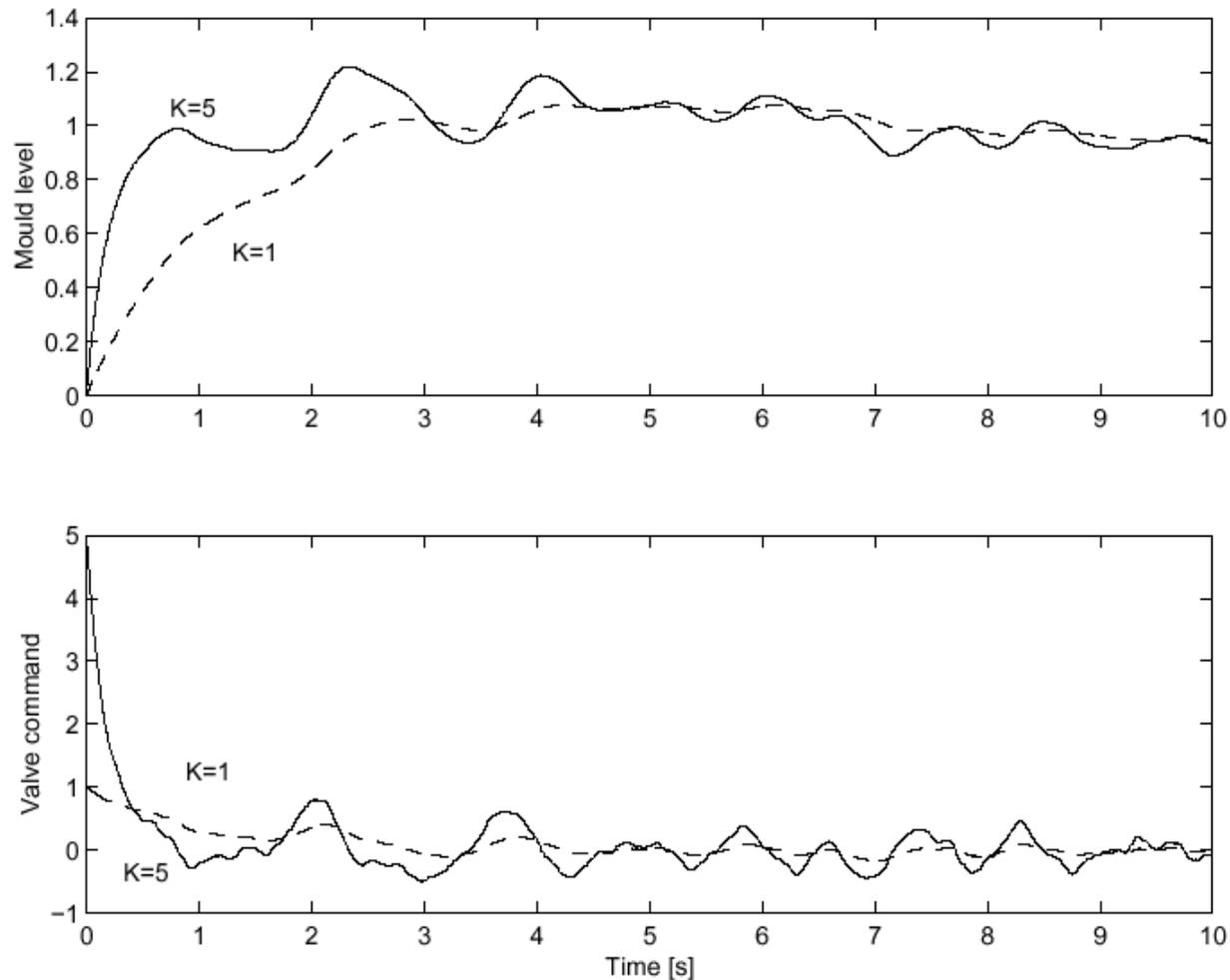


Este controlador combina una acción de realimentación con una acción predictiva.

# Una primer indicación de compromisos de diseño

Simulando la operación del control propuesto para nuestro modelo simplificado de la colada continua para valores de  $K = 1$  y  $K = 5$ , vemos que cuanto más pequeña es la ganancia de control ( $K = 1$ ), más lenta resulta la respuesta del sistema a un cambio en el valor de *set-point*  $h^*$ .

Por otro lado, cuanto mayor es la ganancia de control ( $K = 5$ ), más rápida es la respuesta obtenida, pero también son mayores los efectos del ruido de medición — evidente en oscilaciones mayores en la respuesta permanente y los movimientos más agresivos de la válvula de control.



**Compromisos en diseño:** mayor velocidad de respuesta a cambios en *set-point* trae aparejados mayor sensibilidad a ruido de medición y mayor desgaste del actuador.

# Pregunta

¿Será este compromiso inevitable... o podrá mejorarse la situación, por ejemplo con

- un mejor modelado, o
- un más sofisticado diseño de control?

Este será un tema central en el resto de nuestra discusión.

(*Nota:* de hecho, el compromiso de diseño es *fundamental*, como veremos más adelante.)

# Definición del problema de control

Abstrayendo del ejemplo anterior, podemos introducir la siguiente definición.

## ***Problema de Control:***

*El problema central en control es encontrar una forma técnicamente realizable de actuar sobre un determinado proceso de manera que éste tenga un comportamiento que se aproxime a cierto comportamiento deseado tanto como sea posible.*

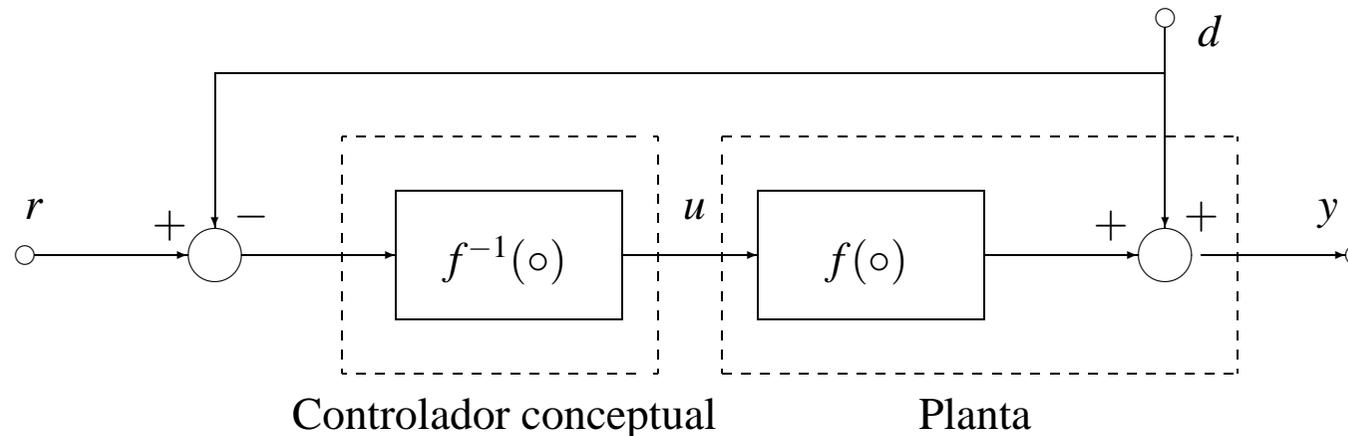
*Además, este comportamiento aproximado deberá lograrse aún teniendo incertidumbres en el proceso, y ante la presencia de perturbaciones externas, incontrolables, actuando sobre el mismo.*

# Solución prototipo del problema de control vía inversión

Una forma particularmente simple, aunque al mismo tiempo profunda, de pensar problemas de control es vía la idea de **inversión**.

- Supongamos que sabemos qué efecto produce en la salida del sistema una acción en la entrada...
- Supongamos además que tenemos un comportamiento deseado para la salida del sistema...
- Entonces, simplemente necesitamos invertir la relación entre entrada y salida para determinar qué acción es necesaria en la entrada para obtener el comportamiento de salida deseado.

La idea de control conceptual por inversión se representa en el diagrama de bloques

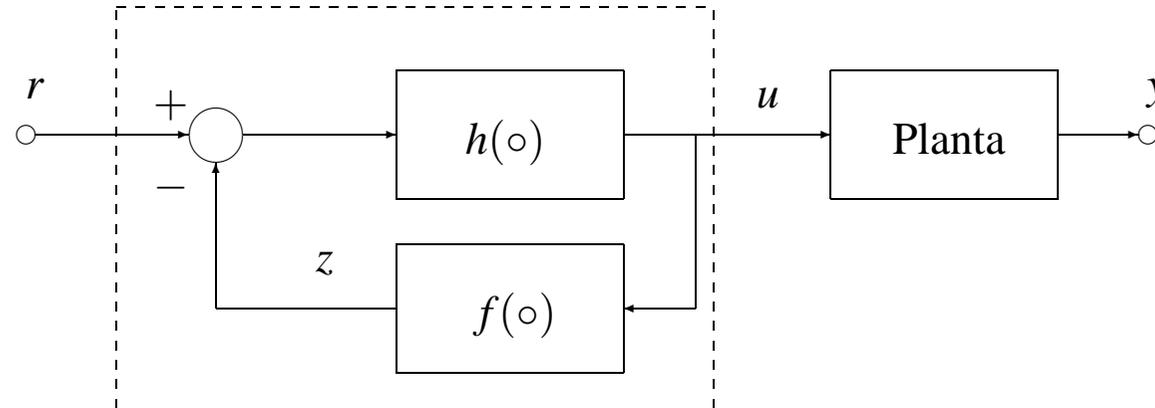


En general, podría decirse que *todos* los controladores generen implícitamente una inversa del proceso, tanto como sea posible (es decir, una inversa *aproximada*).

Los detalles en los que los controladores difieren son esencialmente los mecanismos usados para generar la inversa aproximada necesaria.

# Realimentación con ganancia elevada e inversión

Una propiedad bastante curiosa de la realimentación es que puede *aproximar la inversa implícita de transformaciones dinámicas*.



El lazo implementa una inversa aproximada de  $f(\circ)$ , es decir,  $u = f^{-1}(r)$  si

$$r - h^{-1}(u) \approx r.$$

Mas concretamente, del diagrama de bloques anterior,

$$\begin{aligned}u &= h(r - z) \\ &= h(r - f(u)),\end{aligned}$$

de modo que

$$h^{-1}(u) = r - f(u),$$

de donde obtenemos finalmente

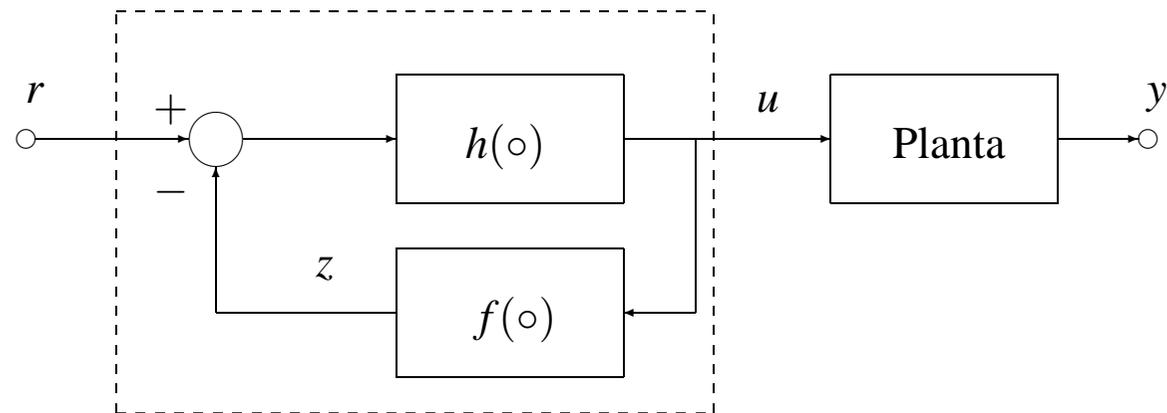
$$u = f^{-1}(r - h^{-1}(u)).$$

Así, si  $h^{-1}(u)$  es pequeño en comparación con  $r$ , vemos que

$$u \approx f^{-1}(r).$$

Que  $h^{-1}(u)$  sea pequeño es lo mismo que decir que  $h(u)$  sea grande, es decir, que  $h(\circ)$  tenga *ganancia elevada*.

**En conclusión:** Puede generarse una inversa aproximada de la planta si colocamos un modelo de la misma en un lazo de realimentación de ganancia elevada.



$f(\circ)$  : modelo de la planta

$h(\circ)$  : ganancia directa de lazo

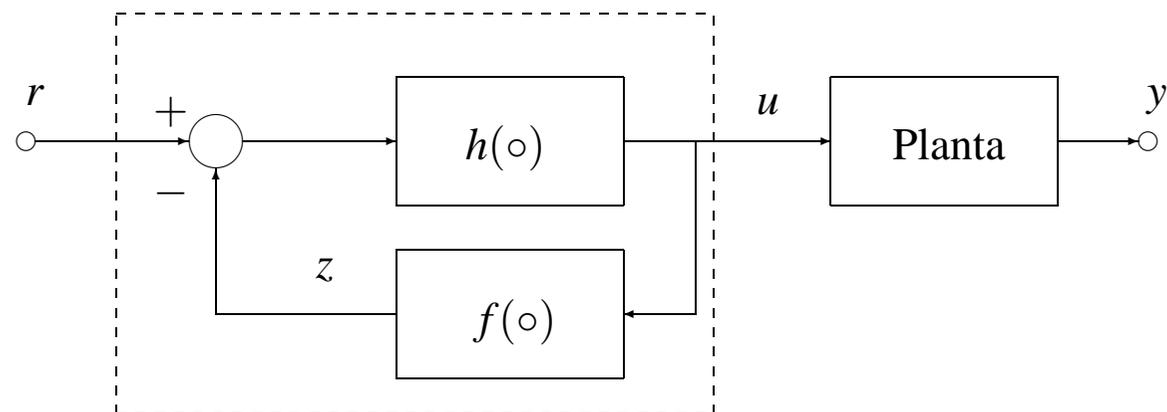
**Ejemplo:** Supongamos una planta descrita por el modelo

$$\frac{dy(t)}{dt} + 2\sqrt{y(t)} = u(t),$$

y que se necesita una ley de control para asegurar que  $y(t)$  siga señales de referencia de variación lenta.

Una forma de resolver este problema es construir una inversa del modelo válida dentro de un rango de bajas frecuencias (señales *lentas*).

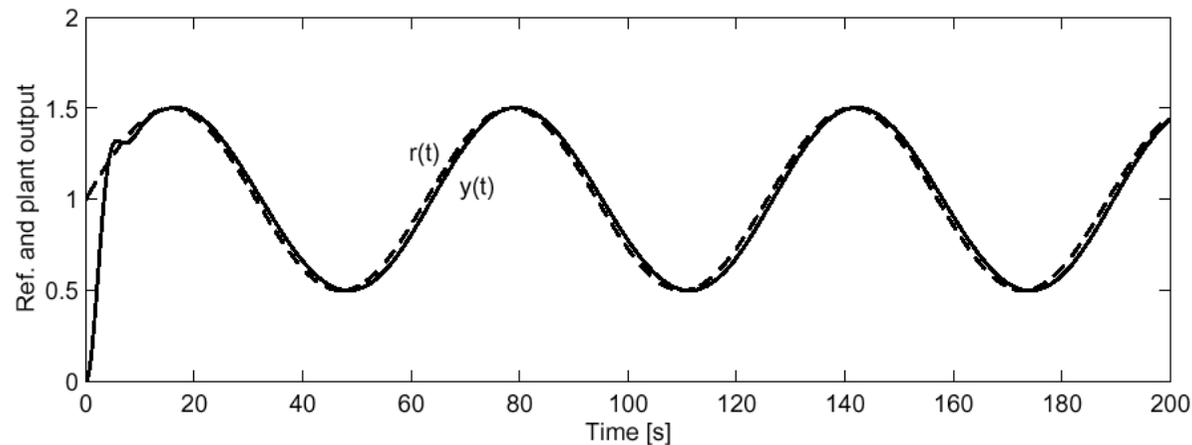
Usando la configuración de control (a lazo abierto)



obtenemos una inversa aproximada si  $h(\circ)$  tiene ganancia elevada en el rango de bajas frecuencias.

Una solución simple es elegir  $h(\circ)$  como *un integrador*.

La figura muestra la referencia  $r(t)$  (sinusoidal) y la correspondiente salida de la planta  $y(t)$  con este control.

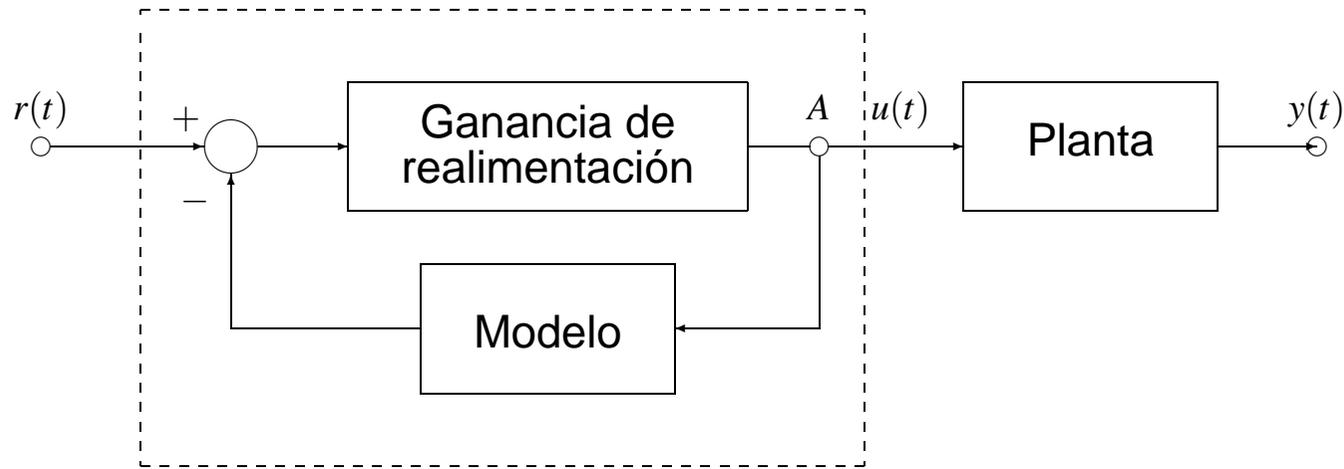


## De lazo abierto a lazo cerrado

Desafortunadamente, la configuración de control que hemos presentado no dará una solución satisfactoria general del problema de control, a menos que

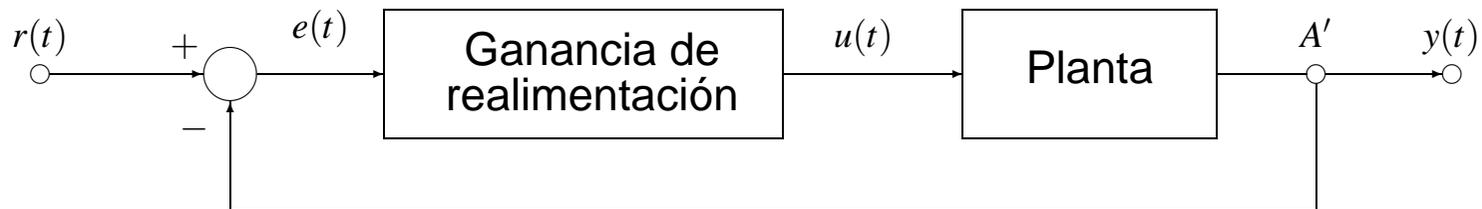
- el modelo en el que se basa el diseño de control sea una muy buena representación de la planta,
- este modelo y su inversa sean estables, y
- las perturbaciones y condiciones iniciales sean despreciables.

Esto nos motiva a buscar una solución alternativa del problema de control reteniendo la esencia básica de la solución propuesta, pero sin sus limitaciones.



Controlador a lazo abierto

## Control a lazo abierto con inversa aproximada incorporada



Controlador a lazo cerrado

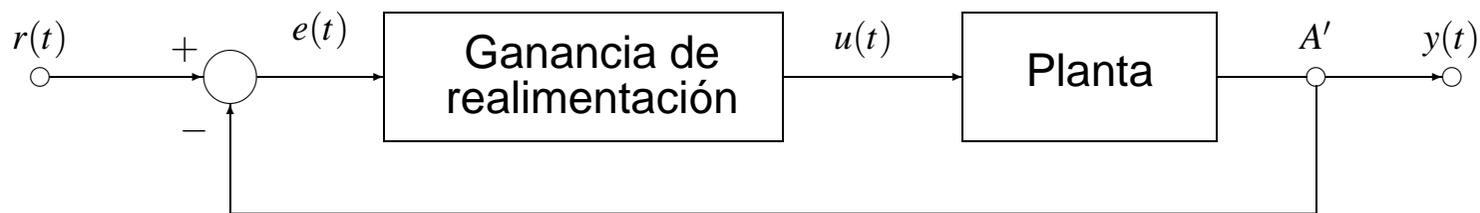
## Control a lazo cerrado

## Control a lazo abierto versus control a lazo cerrado:

- Si el modelo representa a la planta exactamente, y todas las señales son acotadas (o sea, el lazo es estable), entonces ambas configuraciones son equivalentes con respecto a la relación entre  $r(t)$  e  $y(t)$ . Las diferencias principales se deben a perturbaciones y condiciones iniciales.
- En la configuración a lazo abierto, el controlador incorpora la realimentación *internamente*, o sea, se realimenta de  $A$ .
- En la configuración a lazo cerrado, la señal realimentada depende directamente de lo que está pasando con la planta, ya que se realimenta la salida real de la planta de  $A'$ .

La configuración a lazo cerrado tiene muchas ventajas, que incluyen

- insensibilidad a errores de modelado;
- insensibilidad a perturbaciones en la planta (no reflejadas en el modelo).



Controlador a lazo cerrado

# Compromisos en la elección de la ganancia de realimentación

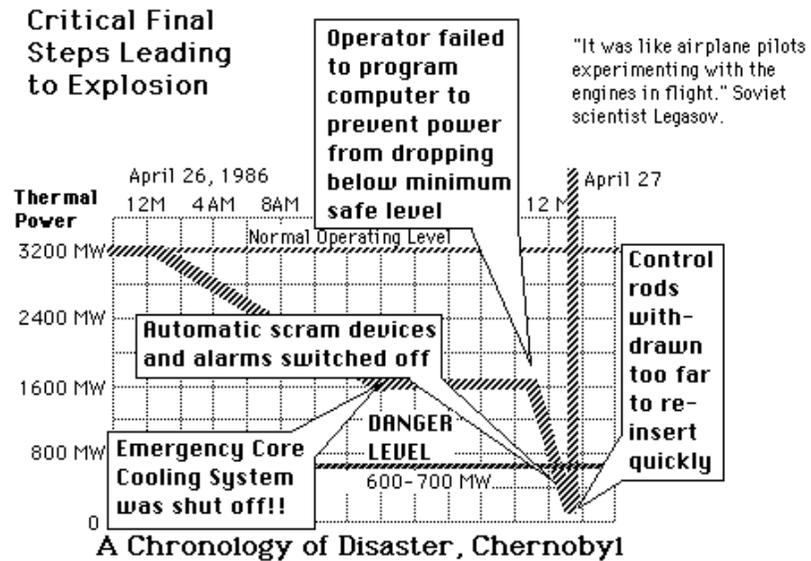
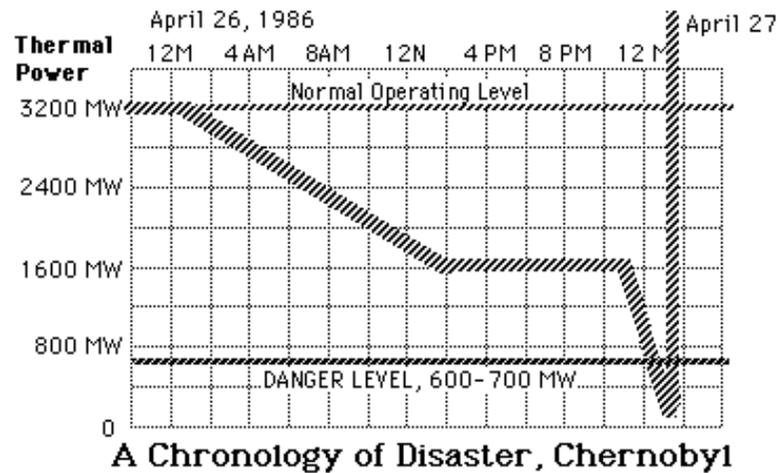
De nuestra discusión hasta ahora, podría pensarse que todo lo que se necesita para resolver el problema de control es cerrar un lazo de ganancia elevada alrededor de la planta. Esto es estrictamente cierto, según lo que discutimos. Sin embargo, nada en la vida viene sin un costo, lo que también se aplica al empleo de una ganancia elevada de realimentación.

Por ejemplo, si alguna perturbación afecta a la planta y produce un error  $e(t)$  distinto de cero, entonces la ganancia elevada produciría una señal de control  $u(t)$  muy elevada también. Tal señal puede exceder el rango permitido de los actuadores e invalidar la solución.

Otro problema potencial con el empleo de ganancia elevada es que a menudo va acompañada de un riesgo muy considerable de *inestabilidad*. La inestabilidad se caracteriza por la presencia de oscilaciones sostenidas (o crecientes).

Por ejemplo, una manifestación de inestabilidad resultante de la excesiva ganancia de realimentación es el silbido de alta frecuencia que se escucha cuando un parlante se coloca demasiado cerca de un micrófono.

# Una manifestación trágica de inestabilidad fue el desastre de Chernobyl.



Otra potencial desventaja del uso de elevada ganancia de lazo fue sugerida en el ejemplo de colada continua. Allí vimos que al incrementar la ganancia del controlador incrementábamos la sensibilidad a ruido de medición — lo que resulta ser cierto *en general*.

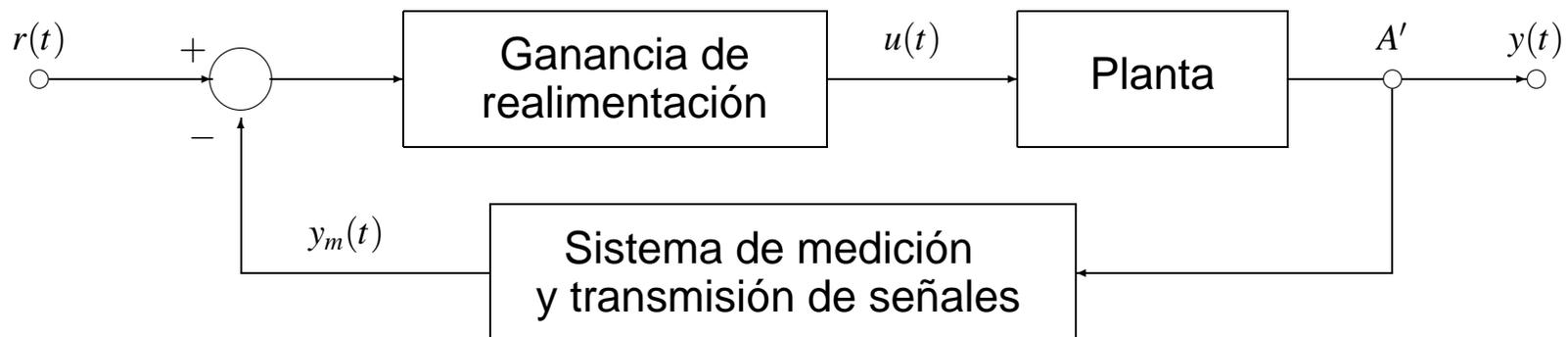
En resumen, la elevada ganancia de lazo es deseable desde muchos aspectos, pero es también indeseable desde otras perspectivas. En consecuencia, cuando se elige la ganancia de realimentación debe arribarse a una solución de compromiso en forma racional, teniendo en cuenta todos los factores en juego.

*La ganancia de lazo elevada permite obtener una inversa aproximada, que es esencial en control. Sin embargo, en la práctica, la elección de la ganancia de realimentación es parte de un complejo balance de compromisos de diseño. La comprensión y el balance adecuado de estos compromisos es la esencia del diseño de sistemas de control.*

# Mediciones

Finalmente pasamos a discutir las mediciones, es decir, lo que usamos para generar una señal de realimentación.

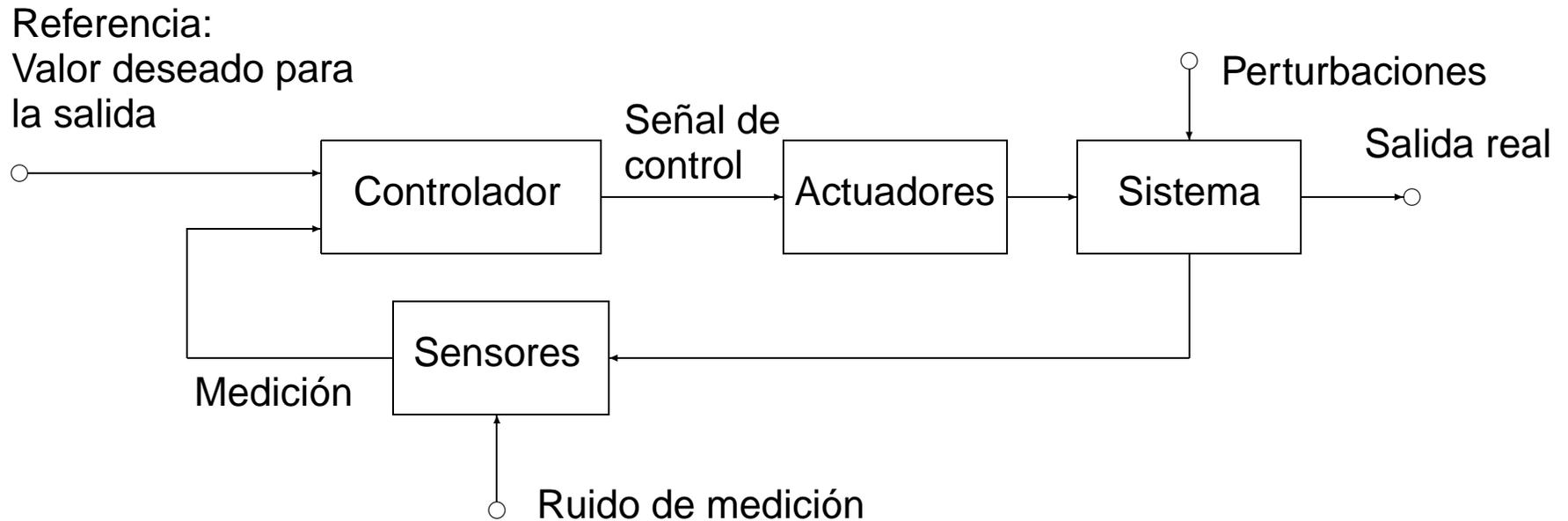
La figura siguiente muestra una descripción más adecuada del lazo de realimentación incluyendo sensores:



## Propiedades deseables de los sensores

- **Confiabilidad.** Deben operar dentro de rangos adecuados.
- **Exactitud.** Para una variable de valor constante, la medición debe estabilizarse en el valor correcto.
- **Sensibilidad.** La medición debe seguir los cambios de la variable medida. Una medición demasiado lenta puede no sólo afectar la calidad del control sino también inestabilizar el lazo, aún cuando el lazo fuera diseñado para ser estable asumiendo medición exacta de la variable del proceso.
- **Inmunidad a ruido.** El sistema de medición, incluyendo los transmisores, no deben ser significativamente afectados por señales espúreas como ruido de medición.
- **Linealidad.** Si el sensor es no lineal, al menos la alinealidad debe ser conocida para que pueda ser compensada.
- **No intrusividad.** El dispositivo de medición no debe afectar en forma significativa el comportamiento de la planta.

En resumen, un lazo de realimentación típico, considerando sensores, presenta la configuración de la figura



# Resumen

- El control se ocupa de encontrar medios tecnológica, ambiental, y comercialmente realizables de actuar sobre un sistema tecnológico para controlar sus salidas a valores deseados manteniendo un nivel deseado de rendimiento.
- Concepto fundamental en ingeniería de control: *inversión*. Puede lograrse inversión en forma aproximada mediante una configuración en realimentación.
- Los objetivos de un sistema de control usualmente incluyen
  - maximización de rendimiento, velocidad, seguridad, etc.
  - minimización de consumo de energía, producción de desechos, emisiones, etc.
  - reducción del impacto de perturbaciones, ruido de medición, incertidumbres, etc.

- Hemos presentado una primer indicación de que los objetivos de diseño deseados usualmente están en conflicto entre sí, por lo que es necesario tomar soluciones de compromiso.
  
- **El diseño de un sistema de control** es el proceso mediante el cual
  - entendemos los compromisos de diseño inherentes al problema,
  - tomamos decisiones deliberadas consistentes con estos compromisos de diseño, y
  - somos capaces de traducir sistemáticamente el objetivo de diseño deseado en un controlador.

- **El proceso de realimentación** refiere al ciclo iterativo:
  - cuantificación del comportamiento deseado,
  - medición de los valores actuales de variables relevantes del sistema mediante sensores,
  - inferencia del estado presente del sistema a partir de las mediciones,
  - comparación del estado inferido con el estado deseado,
  - cálculo de la acción correctora para llevar el sistema al estado deseado,
  - aplicación de la acción correctora al sistema por medio de actuadores, y finalmente,
  - repetir los pasos anteriores.