

# Identificación en lazo cerrado

Prof. Cesar de Prada

ISA-Universidad de Valladolid

# Identificación en lazo cerrado

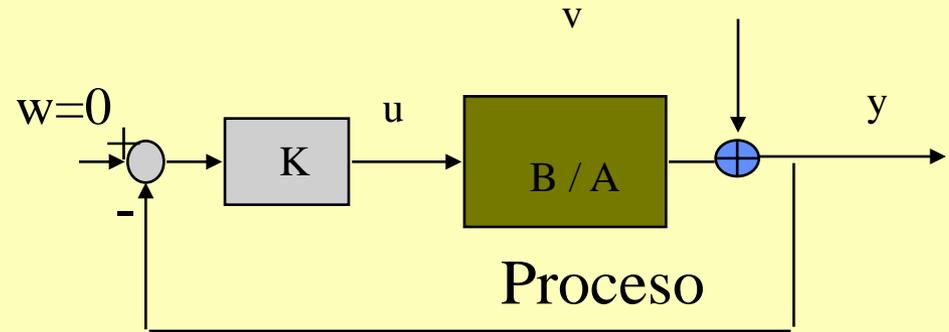
- Hay situaciones (plantas inestables en lazo abierto, o con integradores) en las que los experimentos han de realizarse en lazo cerrado
- Se desea garantizar la operación en un rango durante los experimentos
- Solo se dispone de datos de operación tomados en lazo cerrado, con cambios significativos o excitación externa
- Se desea mejorar la identificación en un rango de frecuencias de interés cercano al punto crítico

# Dificultades, ejemplo

$$y(t) = -ay(t-1) + bu(t-1) + v(t)$$

$$u(t) = -Ky(t)$$

$$\begin{aligned} y(t) &= -ay(t-1) - bKy(t-1) + v(t) = \\ &= -[a + bK]y(t-1) + v(t) \end{aligned}$$



A pesar de que la  $u$  está persistentemente excitada, en una identificación  $u/y$  es válida cualquier solución del tipo:

$$\hat{a} = a + \lambda K$$

$$\hat{b} = b - \lambda$$

$$\begin{aligned} y(t) &= -[\hat{a} + \hat{b}K]y(t-1) + v(t) = -[a + \lambda K + bK - \lambda K]y(t-1) + v(t) = \\ &= -[a + bK]y(t-1) + v(t) \end{aligned}$$

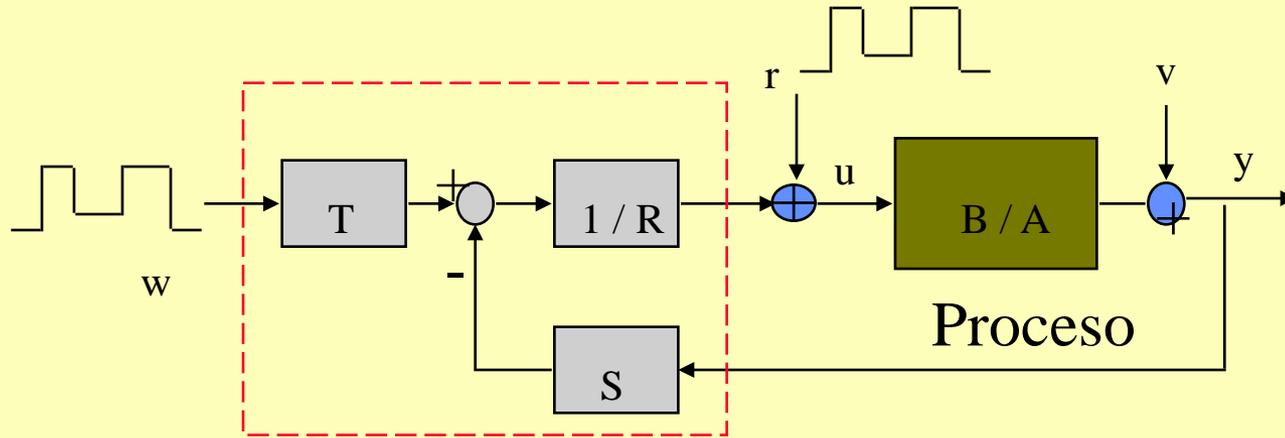
# Dificultades

- La información en lazo cerrado puede no ser lo suficientemente rica y se necesita excitación externa
- La identificabilidad puede depender del tipo de regulador
- Algunos métodos de identificación u/y dan estimas sesgadas si la identificación se realiza con datos en lazo cerrado

# Métodos

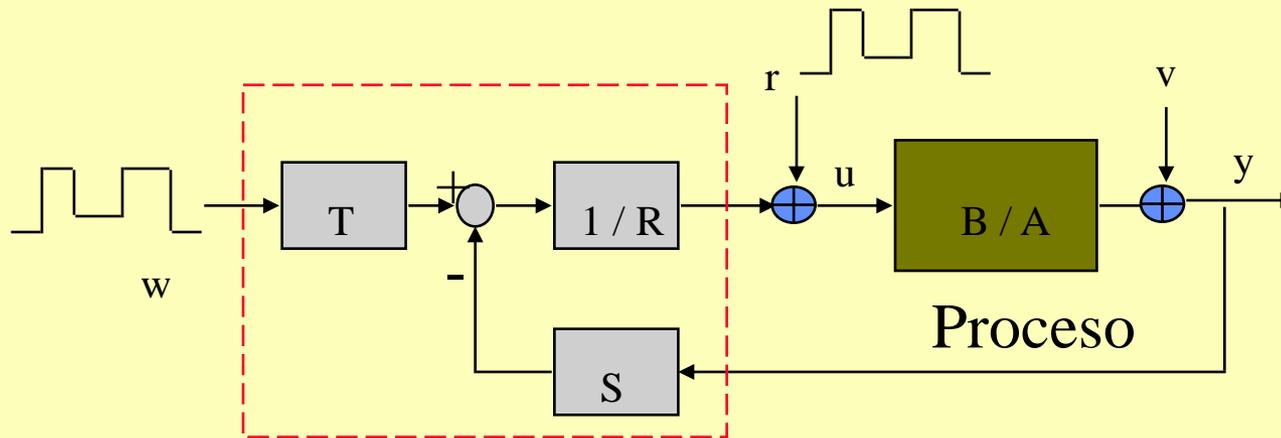
- ✓ Identificar con datos de  $u$  e  $y$  en lazo cerrado (algoritmos PEM) No requieren conocer el regulador
- ✓ Identificar la función de transferencia en lazo cerrado y obtener de ella la de lazo abierto. Requieren conocer el regulador.
- ✓ Identificar un sistema con salidas  $u$  e  $y$ , calculando de ahí la FT en lazo abierto. No requieren conocer los parámetros pero si el tipo de regulador.

# Identificación en la lazo cerrado



- ✓ El conocimiento del controlador no siempre está garantizado
- ✓ Puede excitarse el sistema desde la referencia del controlador o desde una señal externa  $r$

# Identificación en lazo cerrado con $u/y$

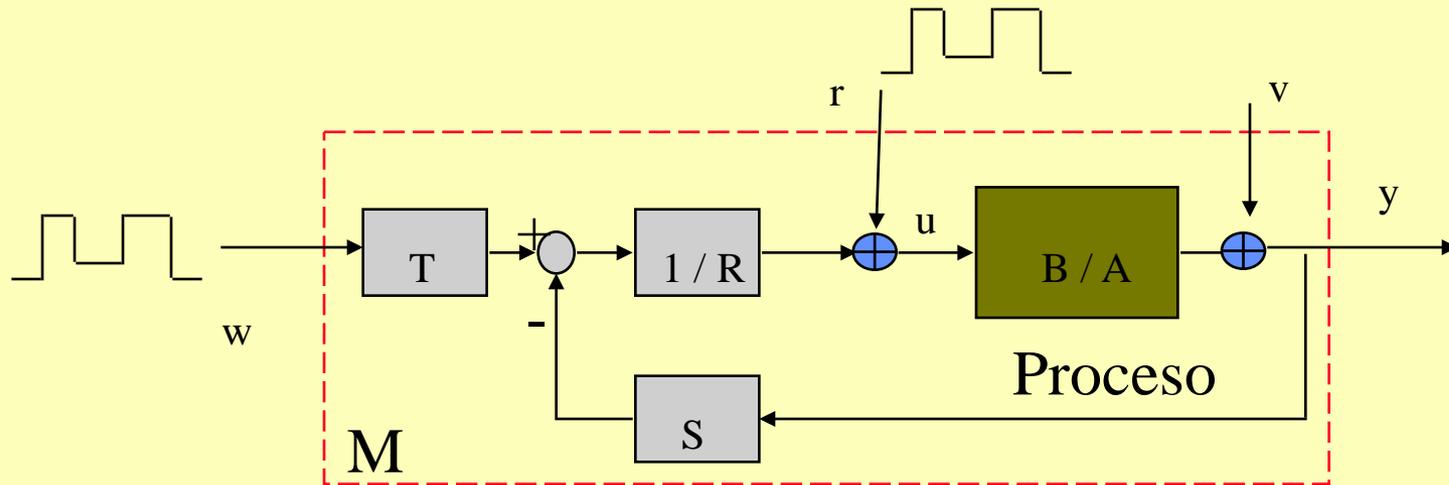


Pueden usarse datos de entrada - salida,  $u$  e  $y$  en lazo cerrado y métodos PEM

La identificación no es mejor en la zona de frecuencias de interés

No requiere conocimiento del controlador

# Identificación de todo el lazo cerrado

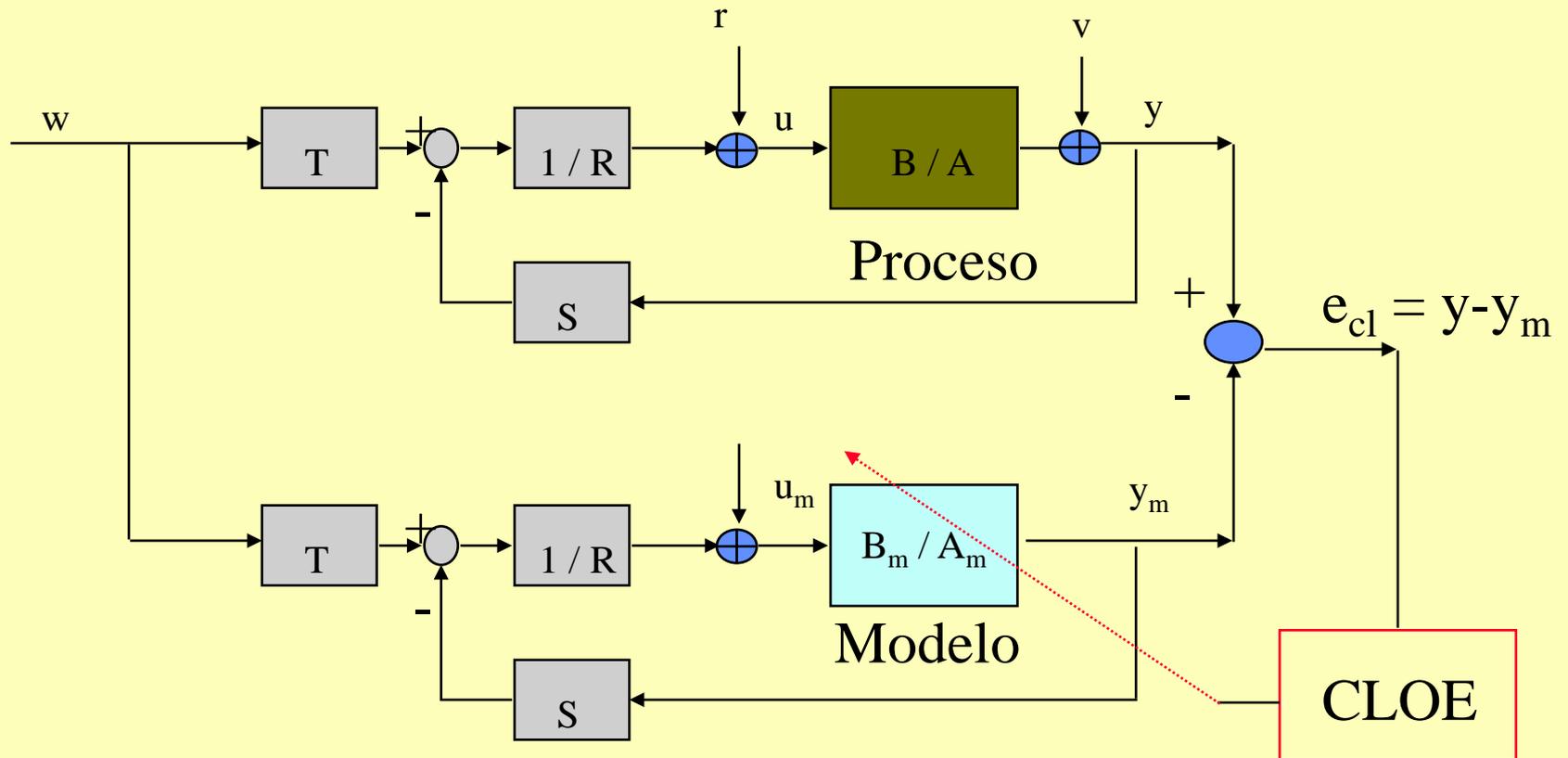


Puede identificarse el sistema completo  $M$  entre  $w$  e  $y$  o entre  $r$  e  $y$  como un proceso cualquiera si hay una excitación adecuada. Posteriormente se calcula  $B/A$  mediante:

$$M = \frac{BT}{AR + BS}$$

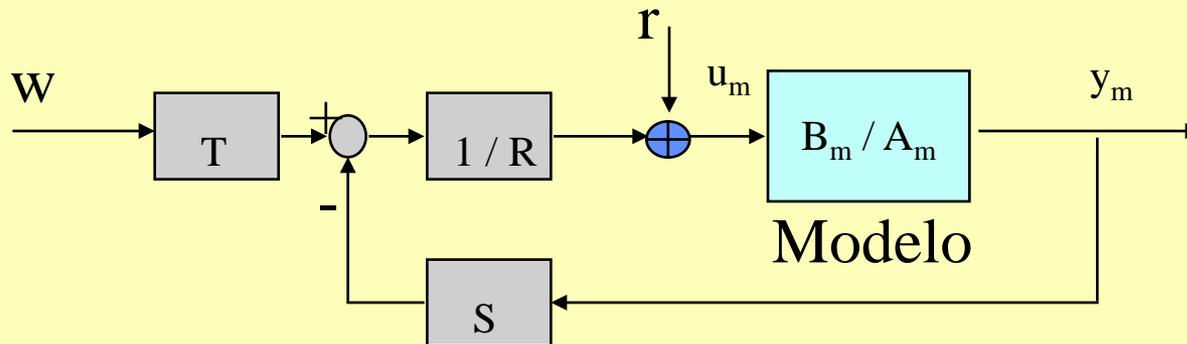
La solución depende del orden del regulador

# Método de identificación del error de la salida en lazo cerrado



Closed Loop Output Error CLOE

# Modelo para CLOE



$$y_m(t) = \varphi(t)' \theta(t)$$

$y_m$  es una función no lineal de  $\theta$

$$\varphi(t)' = [-y_m(t-1), \dots, -y_m(t-n), u_m(t-1), \dots, u_m(t-m)]$$

$$\theta(t)' = [\hat{a}_1(t), \dots, \hat{a}_n(t), \hat{b}_1(t), \dots, \hat{b}_m(t)]$$

$$u_m(t) = \frac{T}{R} w - \frac{S}{R} y_m + r$$

# Algoritmo CLOE

Closed Loop Output Error CLOE  $y_m(t) = \varphi(t)' \theta(t)$

$$\min_{\theta} V = \min_{\theta} \sum_{t=1}^N e_{cl}(t)^2 = \min_{\theta} \sum_{t=1}^N [y(t) - y_m(t)]^2$$

$$\theta(t) = \theta(t-1) + \frac{P(t-1)\varphi(t)}{1 + \varphi(t)'P(t-1)\varphi(t)} [y(t) - \varphi(t)'\theta(t-1)]$$

$$P(t)^{-1} = \lambda_1 P(t-1)^{-1} + \lambda_2 \varphi(t)\varphi(t)'$$

$$0 \leq \lambda_1 \leq 1 \quad 0 \leq \lambda_2 \leq 2$$

# Propiedades

Si la planta pertenece al conjunto de modelos, se aplica una excitación externa independiente respecto a las perturbaciones y estas son de media cero y potencia finita y  $R/(AR+BS) - \lambda/2$  es estrictamente positiva real, con  $2 > \lambda > \lambda_2$

- Entonces el algoritmo CLOE es asintóticamente estable para cualquier condición inicial
- Proporciona un predictor óptimo
- Da estimas asintóticamente no sesgadas
- Requiere el conocimiento del controlador y a menudo no es tan sencillo y tiene no-linealidades

# Dominio de la frecuencia

$$V = \sum_{t=1}^N e_{cl}(t)^2 = \sum_{t=1}^N [y(t) - y_m(t)]^2$$

$$y(t) = G(q^{-1})u(t) + v(t)$$

$$u(t) = \frac{Tw(t) - Sy(t)}{R} + r(t)$$

$$y_m(t) = \hat{G}(q^{-1})u_m(t)$$

$$u_m(t) = \frac{Tw(t) - Sy_m(t)}{R} + r(t)$$

Con N infinito y usando el teorema de Parserval

$$\int_0^{NT} x(t)^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi/T}^{\pi/T} \Phi_x(\omega) d\omega$$

# Dominio de la frecuencia

$$V = \int_{-\pi}^{\pi} |G(j\omega) - \hat{G}(j\omega)|^2 |S_{vy}(j\omega)|^2 \left( \begin{array}{l} |\hat{S}_{wu_m}(j\omega)|^2 \Phi_w(\omega) + \\ + |\hat{S}_{vy_m}(j\omega)|^2 \Phi_r(\omega) \end{array} \right) d\omega +$$
$$+ \int_{-\pi}^{\pi} |S_{vy}(j\omega)|^2 \Phi_v(\omega) d\omega$$

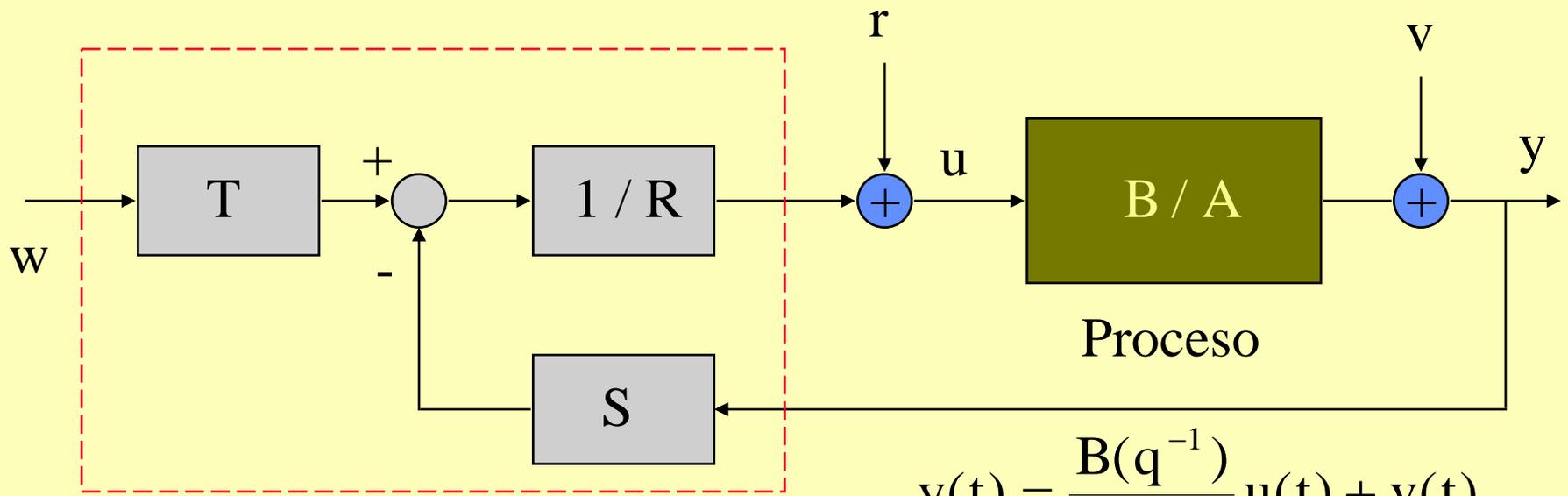
- El ruido no afecta la estimación de los parámetros
- Los errores disminuyen en la región donde  $S_{vy}$  y el espectro de la señal de excitación son grandes

# Identificación en lazo cerrado

El objetivo es obtener una identificación mas próxima al sistema real en la región de frecuencias en torno al punto crítico, que es la mas importante en el diseño de un controlador

Para ello se utiliza una función de coste para identificar similar al objetivo de diseño del controlador, dentro del contexto de la metodología de identificación en lazo cerrado y re-diseño del controlador

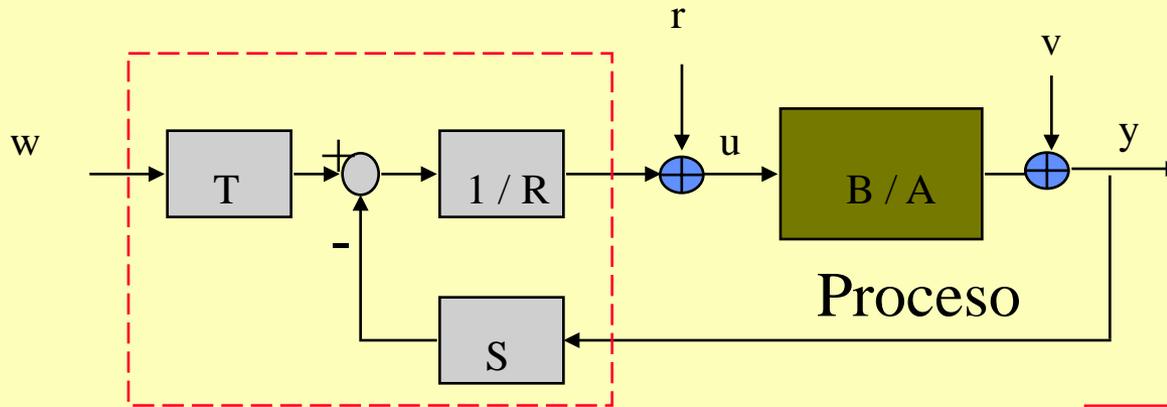
# Identificación en lazo cerrado



$$y(t) = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} u(t) + v(t)$$

$$u(t) = r(t) + \frac{1}{R(q^{-1})} \left[ T(q^{-1}) w(t) - S(q^{-1}) y(t) \right]$$

# Funciones de transferencia



$$y = \frac{BT}{AR + BS} w + \frac{BR}{AR + BS} r + \frac{AR}{AR + BS} v$$

$S_{wy}$

$S_{ry}$

$S_{vy}$

$$u = \frac{AT}{AR + BS} w + \frac{AR}{AR + BS} r - \frac{AS}{AR + BS} v$$

$S_{wu}$

$S_{ru}$

$S_{vu}$

$$S_{vy} = S_{ru}$$

Como  $S_{ru}$  depende de datos medibles,  $S_{vy}$  puede ser identificado

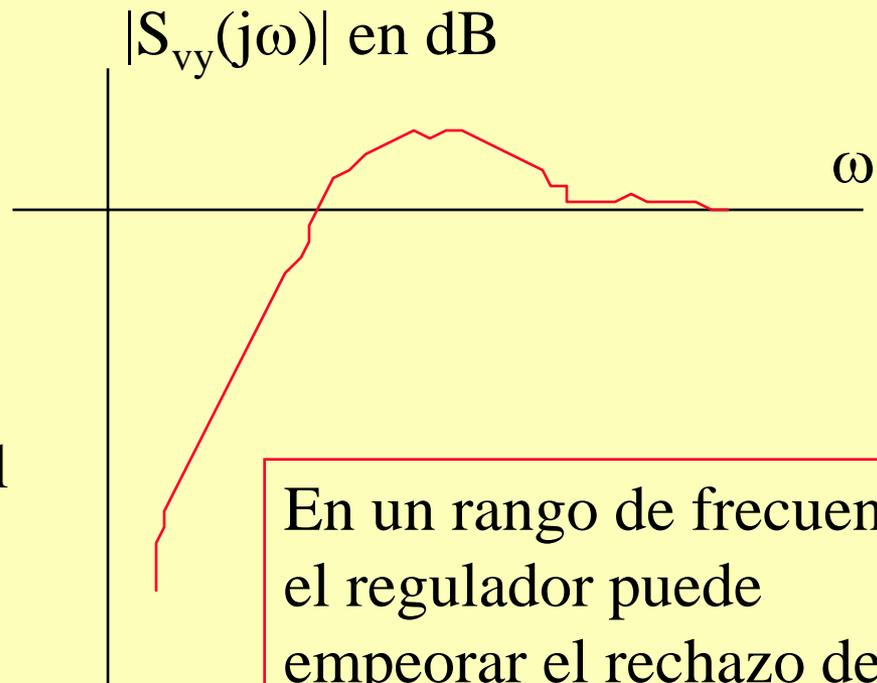
# Rechazo de perturbaciones

$$S_{vy} = \frac{AR}{AR + BS} = \frac{1}{1 + \frac{BS}{AR}(j\omega)}$$

si  $S / R$  tiene accion integral

$$\text{si } \omega \rightarrow 0 \quad S_{vy} \rightarrow 0$$

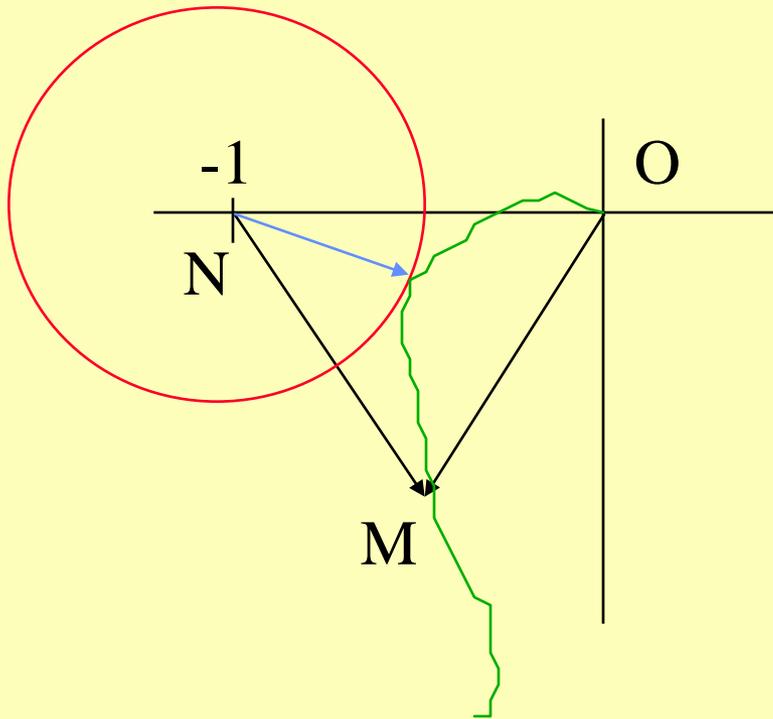
$$\text{si } \omega \rightarrow \infty \quad S_{vy} \rightarrow 1$$



En un rango de frecuencias, el regulador puede empeorar el rechazo de perturbaciones.

Importante minimizar el maximo  $|S_{vy}(j\omega)|$

# Margen de Módulo



$$-1 + \overline{NM} = \overline{OM} = \frac{B(j\omega) S(j\omega)}{A(j\omega) R(j\omega)}$$

$$|\overline{NM}| = \left| 1 + \frac{BS}{AR} \right| = \left| \frac{AR + BS}{AR} \right| = |S_{vy}^{-1}|$$

Margen de Módulo =

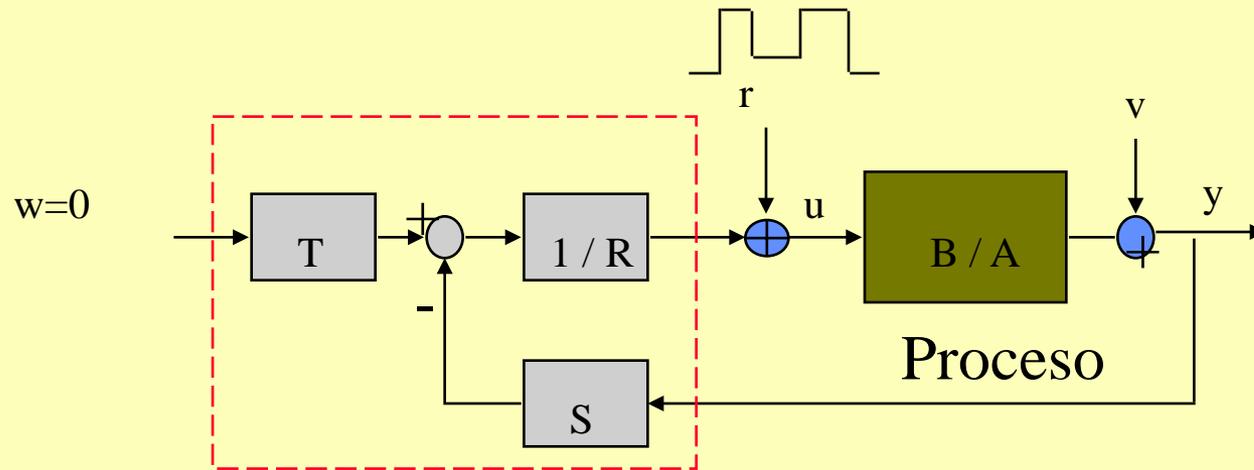
$$\min |NM| = (\max |S_{vy}(j\omega)|)^{-1}$$

$$= \|S_{vy}(j\omega)\|_{\infty}^{-1}$$

Diagrama de Nyquist

Un margen de módulo mayor mejora el rechazo de perturbaciones

# Identificación en lazo cerrado



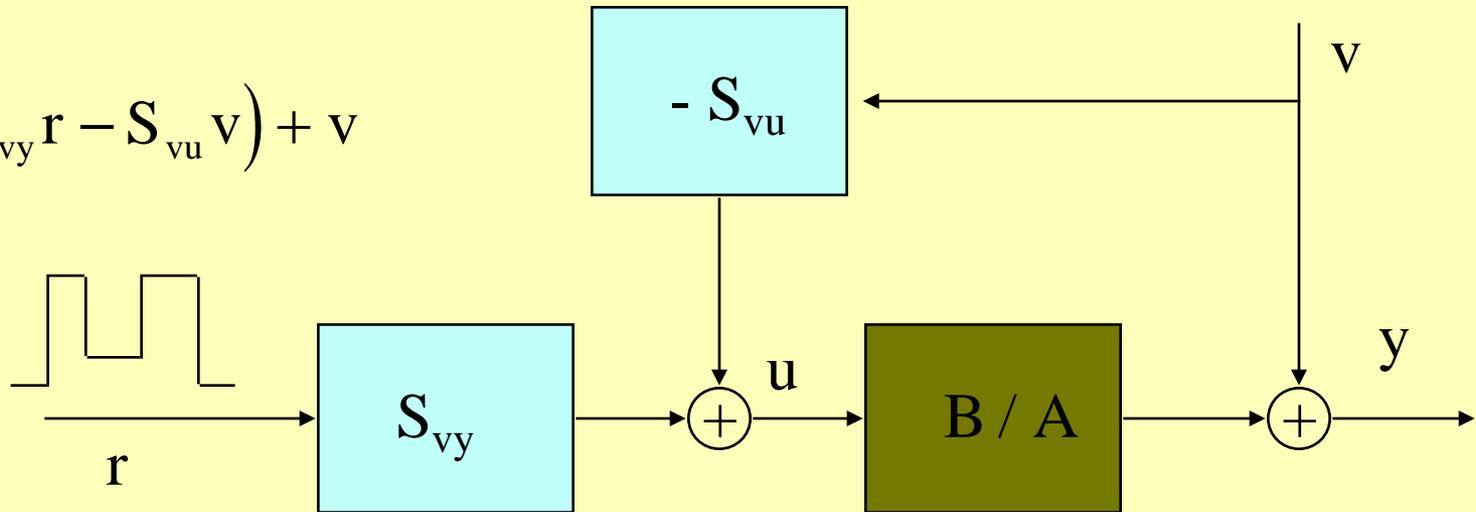
Con  $w=0$

$$y = \frac{B}{A} u + v = \frac{B}{A} (S_{ru} r - S_{vu} v) + v =$$

$$= \frac{B}{A} (S_{vy} r - S_{vu} v) + v$$

# Interés de la CL-ID

$$y = \frac{B}{A} (S_{vy} r - S_{vu} v) + v$$



Identificar en lazo cerrado entre  $y$  &  $u$  con excitación en  $r$ , asegura que  $u$  recibe componentes filtrados por  $S_{vy}$ . Así se mejora la identificación en frecuencias cercanas a la del margen de módulo, donde  $S_{vy}$  es grande.

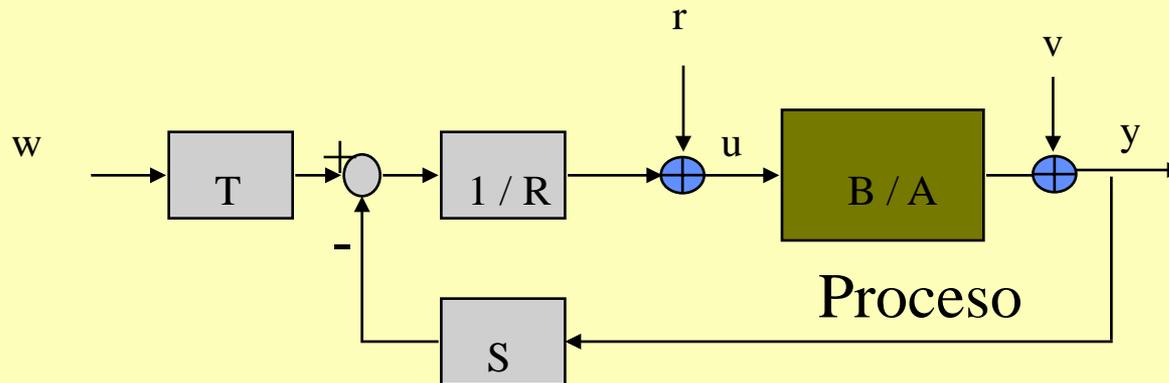
Problema de ruido a través de  $-S_{vu}v$

# FOL

## Filtered Open Loop Identification Algorithms

Algoritmos estándar de identificación en lazo abierto pero utilizando datos filtrados de entrada- salida obtenidos en lazo cerrado. Inspirados por

$$y = \frac{B}{A} (S_{vy} r - S_{vu} v) + v$$



No necesitan conocimiento de los parámetros del controlador

# FOL-OE Two-stage method

$$y = \frac{B}{A} (S_{vy}r - S_{vu}v) + v \quad u_f = S_{vy}r$$

$$y = \frac{B}{A} u_f - \left( \frac{B}{A} S_{vu}v - v \right)$$

- Se puede aplicar un método en lazo abierto entre  $u_f$  e  $y$  para identificar  $B/A$
- Como  $S_{vy} = S_{ru}$ ,  $S_{vy}$  puede estimarse identificando  $S_{ru}$  entre  $r$  y  $u$  previamente y, por tanto, calcular  $u_f$
- Proporciona una estimación sesgada debido al ruido

# FOL-IV

- Identificar  $S_{vy}$  a partir de datos de  $r$  y  $u$  estimando  $S_{ru}$
- Generar una variable instrumental  $u_f = S_{vy} r$
- Filtrar  $u_f$  e  $y$  con un filtro paralelo,  $S_{vy}$
- Aplicar el algoritmo del error de la salida en lazo abierto con estos datos

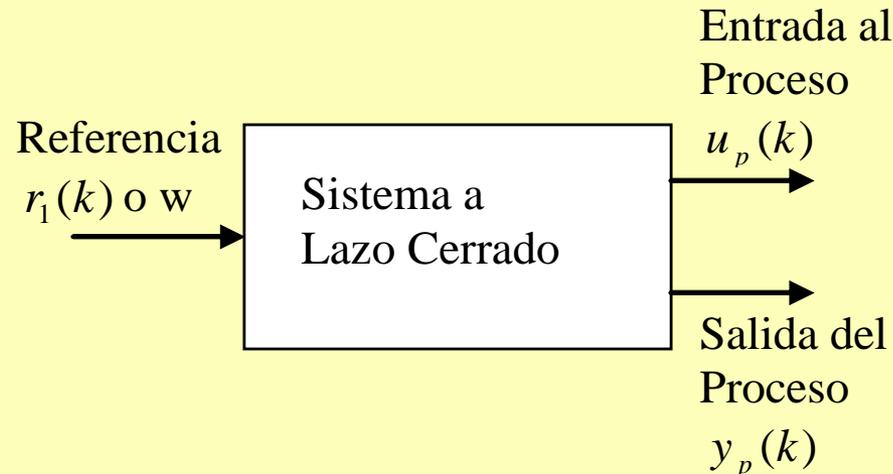
De este modo se elimina el sesgo en las estimas

# FOL-IV dominio frecuencial

$$V = \int_{-\pi}^{\pi} |G(j\omega) - \hat{G}(j\omega)|^2 |S_{vy}(j\omega)|^2 |\hat{S}_{vy}(j\omega)|^2 \Phi_r(\omega) d\omega + \\ + \int_{-\pi}^{\pi} |S_{vy}(j\omega)|^2 |\hat{S}_{vy}(j\omega)|^2 \Phi_v(\omega) d\omega$$

- No presenta sesgo
- La estimación se mejora en el rango de frecuencias en que  $S_{vy}$  y la señal de excitación en  $r$  son altas
- Es proxima a la expresión del algoritmo CLOE

# Modelo con salidas u/y



Identificarlo como un modelo en lazo abierto

Simular el sistema identificado con entradas  $r$  para generar señales  $u_s / y_s$  sin ruido.

Usar las señales  $u_s / y_s$  para identificar el modelo en lazo abierto, que será no sesgado al no tener ruido. No se necesita conocer la estructura del regulador.

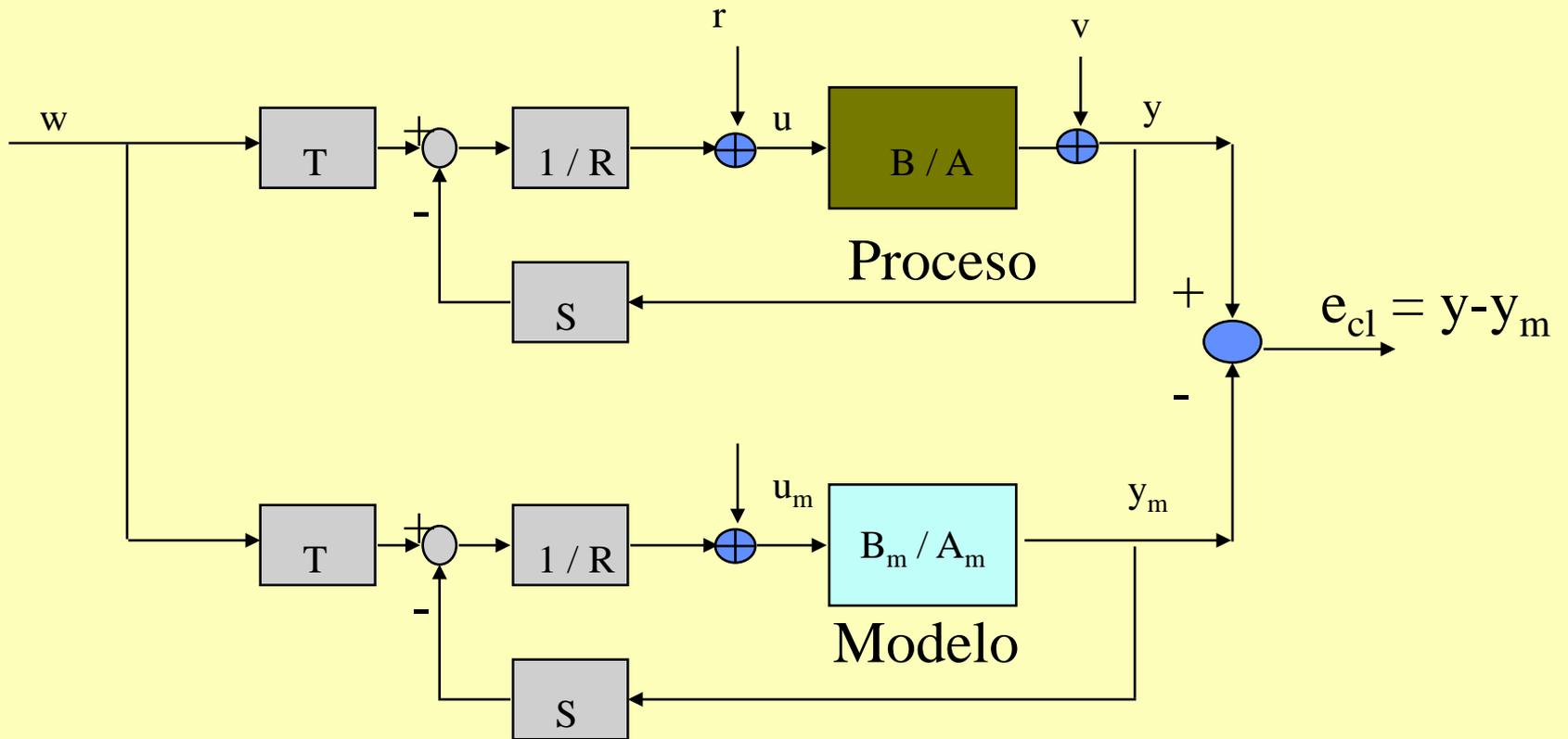
# Validación en lazo cerrado

¿ El modelo identificado junto al regulador presente en la toma de datos reproducen el comportamiento del sistema en lazo cerrado ?

**Criterios (dependen del controlador):**

- ☐ Comparación de respuestas temporales del proceso en lazo cerrado con las del modelo y regulador en lazo cerrado
- ☐ Test estadísticos sobre el error de la salida en lazo cerrado similares a los de lazo abierto
- ☐ Comparación de los polos identificados en lazo cerrado con los calculados mediante el regulador y el modelo estimado

# Validación



# Identificación en lazo cerrado y re-diseño del controlador

- Se identifica con datos generados por un controlador conocido
- Se diseña un nuevo controlador
- Se repite el proceso si es necesario
- Los datos generados en lazo cerrado con un controlador serán mas próximos a los datos que manejará el controlador diseñado que los que se utilizan en identificación en lazo abierto