

Control por modelo interno (Internal Model Control, IMC): Metodología de diseño

Antonio Sala

AI²-DISA-UPV

Video-presentación disponible en:

<http://personales.upv.es/asala/YT/V/imcfm.html>

Presentación

Motivación:

El control por modelo interno es un diagrama de bloques donde todas las funciones de transferencia de bucle cerrado dependen de forma “sencilla” (afín) de un parámetro Q que sólo requiere ser estable.

Objetivos:

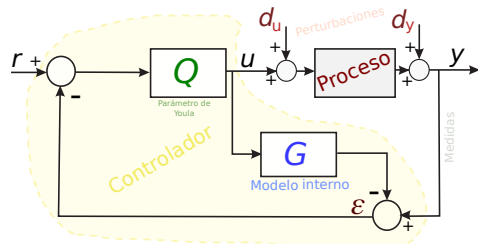
Comprender cómo esa expresión sencilla de la salida en función de Q permite establecer reglas fáciles de diseño (caso G estable y fase mínima).

Contenidos:

Revisión fórmulas IMC. Metodología. Selección de modelo de referencia. Ejemplo. Conclusiones.



Revisión fórmulas IMC



$$y = GQr + (I - GQ)Gd_u + (I - GQ)d_y \quad u = Qr - Q(Gd_u + d_y)$$

- Para seguimiento de referencias, $y = Tr$, $T = GQ$.
- Para regulación (rechazo de perturbaciones), el efecto en bucle abierto ($Gd_u + d_y$) se multiplica por $S = 1 - T$ (sensibilidad);
- a las frecuencias en las que $T \approx 1$, $S \approx 0$: se seguirán bien las referencias y se cancelarán bien las perturbaciones.

Metodología de diseño

Dado que:

- $y = GQr$ para seguimiento de referencias,
- $y = (I - GQ) \cdot (\text{efecto pert. B.A.})$

el IMC se plantea como objetivo $QG \approx 1$, esto es $Q \approx G^{-1}$. ¡Resulta una regla muy sencilla!

Problemas:

- 1 G^{-1} no es realizable (sube y sube a alta frecuencia).
- 2 G^{-1} será inestable si G es de fase no mínima.
- 3 G^{-1} será no causal (anticipativo) si G tiene retardos.

Selección de modelo de referencia

Con $Q = G^{-1}M$, se tiene $y = Mr + (I - M)(Gd_u + d_y)$, de modo que M se interpreta como un **modelo de referencia** deseado. Si G no tiene retardo ni elementos de fase no mínima G^{-1} es estable pero su respuesta en frecuencia tiende a infinito (en la mayoría de casos) cuando la frecuencia crece. Entonces:

- M debe ser paso-bajo para que $Q = G^{-1}M$ sea realizable.
- $y = Mr$ debe tener una respuesta escalón “satisfactoria”:
 - ganancia estática cercana a 1 (error de posición pequeño), o igual a 1 (error posición cero).
 - Dinámica suficientemente rápida
- La respuesta temporal ante perturbaciones de salida $y = (I - M) \cdot \delta_y$ o de entrada $y = (I - M)G \cdot \delta_u$ debe también ser satisfactoria.

Diseño de M : caso G fase mínima, sin retardo

La propuesta más usual es elegir $M = \frac{1}{(\tau_M s + 1)^\nu}$, siendo $\nu \geq$ grado relativo (grado denominador-grado numerador) de G .

Entonces $y = Mr = \frac{1}{(\tau_M s + 1)^\nu} r$ (respuesta ante referencia no oscilatoria, constante de tiempo τ_M como parámetro de diseño), $u = Qr = G^{-1} \frac{1}{(\tau_M s + 1)^\nu} r$:

- τ_M debe ser **suficientemente** pequeño (deseamos bucle rápido),
- τ_M no puede ser “demasiado” pequeño: **step(Q)** o **bodemag(Q)** es la resp. temporal/frecuencial de la **acción de control** ante cambios de ref., que no debería **saturar** ni **amplificar demasiado** la alta frecuencia –por robustez/durabilidad del actuador–

Ejemplo

Sea el proceso $G(s) = \frac{4}{s+1}$. El objetivo es acelerarlo sin saturar actuador, mediante IMC. El actuador satura en ± 1 .

Podemos comprobar que, con $M = \frac{1}{0.25s+1} = \frac{4}{s+4}$ tenemos

$Q = G^{-1}M = \frac{(s+1)}{(s+4)}$, que es estable y realizable (Matlab: `Q=inv(G)*M`).

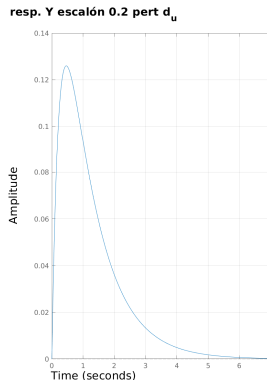
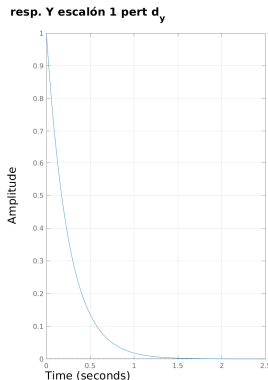
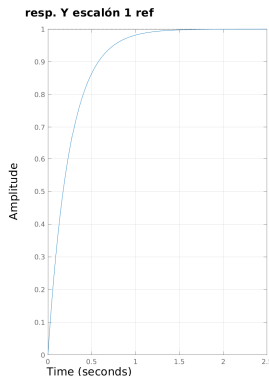
Usando la equivalencia **IMC** $\leftrightarrow$ **control convencional**, podemos despejar el controlador equivalente (Matlab: `K=minreal(feedback(Q,G,+1))`):

$$K = \frac{Q}{1 - QG} = \frac{s+1}{s} = 1 + \frac{1}{s}$$

Que resulta un **PI**, diseñado mediante IMC, si optamos por la versión *implícita* (aconsejable, dado que el resultado es un controlador proporcional-integral clásico).

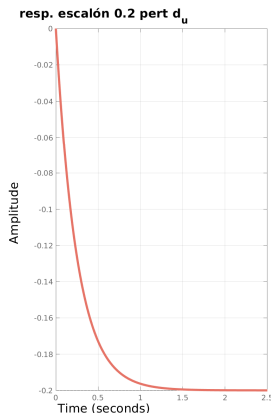
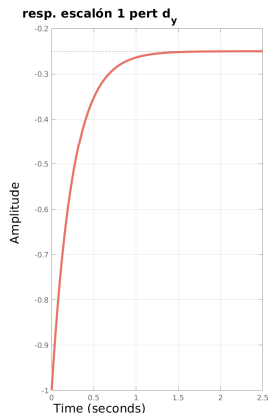
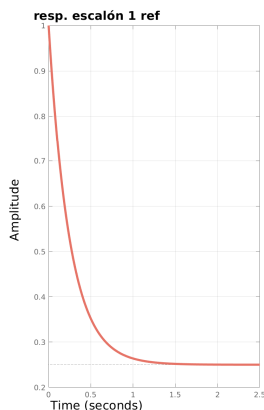
Respuesta temporal (variable controlada y)

La respuesta ante referencia (escalón 1), perturb. salida (escalón 1) y perturb. entrada (escalón 0.2) de y es $\text{step}(M, 1-M, (1-M)*G*0.2)$:



Respuesta temporal (variable manipulada u)

La respuesta ante referencia (escalón 1), perturb. salida (escalón 1) y perturb. entrada (escalón 0.2) de u es $\text{step}(Q, -Q, -Q*G*0.2)$:



Conclusiones

- El diagrama de bloques con modelo interno (IMC) responde a la idea intuitiva de que, formalmente, la realimentación debe manejar las diferencias entre la “simulación” y la “medida”. Sólo funciona con procesos estables (si son inestables, esa diferencia tiende a infinito).
- El diseño ante ref. es idéntico en bucle abierto y bucle cerrado $y = GQr$. Está basado en la inversa del modelo G .
- Se suele hacer $Q = G^{-1}M$, siendo M el modelo deseado $y = Mr$.
- Para que Q sea estable, causal, y realizable, M no puede ser arbitrario: si G es de fase mínima, $M = \frac{1}{(\tau_M s + 1)^\nu}$ suele ser una buena/sencilla elección, con ν y τ_M como parámetros de diseño.