Roberto Cárdenas Dobson
Departamento de Ing. Eléctrica
Universidad de Chile

EL 4004
Fundamentos de Control de Sistemas

Controladores en Variables de Estado

Diapositivas basadas en las realizadas por la profesora Constanza Ahumada
y el profesor Greg Asher
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Chile

Controlador con Seguimiento de Referencia - Forma Canónica Modal

- Considerar:

$$\dot{\mathrm{x}} = \mathrm{Ax} + \mathrm{Bu}$$
$$\mathrm{y} = \mathrm{Cx}$$

- Primero se debe transformar el sistema a la forma canónica modal/diagonal.

$$\dot{x}_D = \Lambda x_D + Qu$$

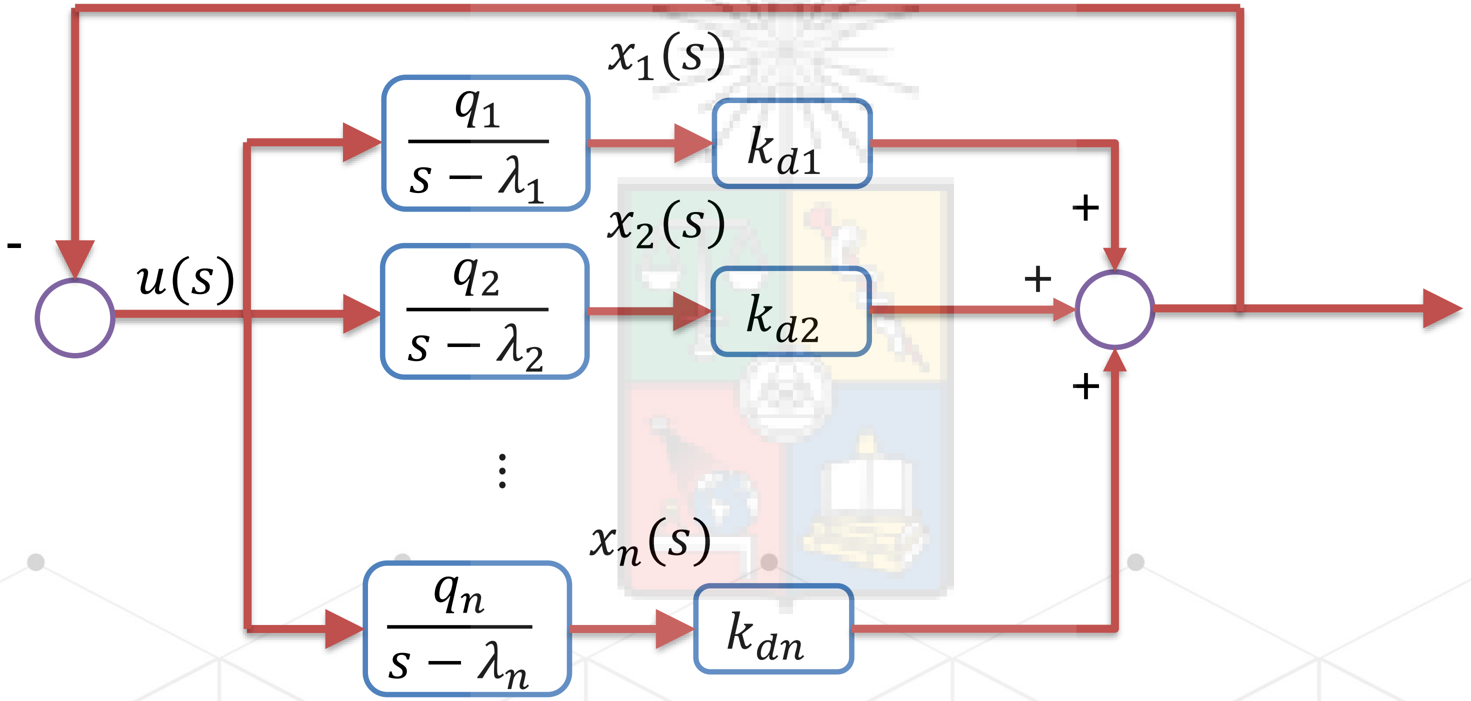
Donde:

$$Q = \vec{v}^{-1}\mathrm{B}$$

$$\dot{x}_D = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \lambda_n \end{bmatrix} x_D + \begin{bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} u$$

Controlador con Seguimiento de Referencia - Forma Canónica Modal

- Diagrama de Bloques:



- Ley de Control:

$$u = -K_d x_D = -[k_{d1} \quad k_{d2} \quad \ldots \quad k_{dn}]x_D$$

Ejercicio Propuesto

Para el sistema dado por:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -2 & 1 \\ 0 & -3 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} u$$

Se desea mantener la referencia del sistema de tal forma que se tengan polos en lazo cerrado ubicados en:

$$s = -5 \pm j5$$

Determine el controlador K.

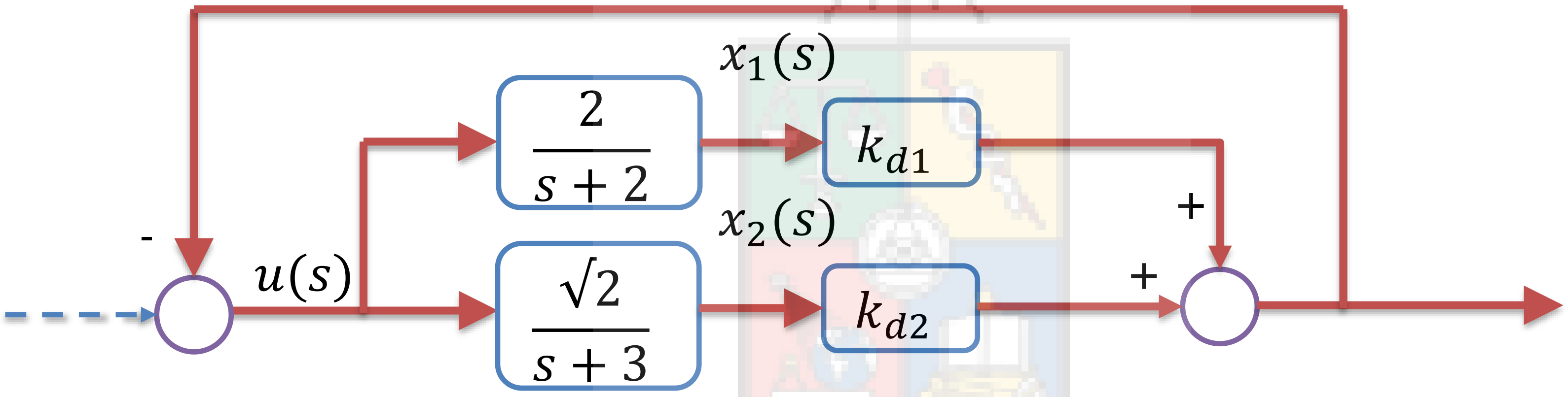
Los vectores propios son: $v_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ $y\ v_2 = \begin{bmatrix} +1/\sqrt{2} \\ -1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$

Por lo tanto la matriz de transformación es: $T = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & \sqrt{2} \end{bmatrix}$

Se desea mantener la referencia del sistema de tal forma que se tengan polos en lazo cerrado ubicados en:

$$s = -5 \pm j5$$

Forma modal $\quad \dot{x}_m = \begin{bmatrix} -2 & 0 \\ 0 & -3 \end{bmatrix} x_m + \begin{bmatrix} 2 \\ \sqrt{2} \end{bmatrix} u$



A lazo cerrado queda: $1 + \frac{2K_{d1}}{s+2} + \frac{\sqrt{2}K_{d2}}{s+3} = 0 \ = 0$

$$(s+2)(s+3) + 2K_{d1}(s+3) + \sqrt{2}K_{d2}(s+2) = (s+5+j5)(s+5-j5) = s^2 + 10s + 50$$

Resolviendo la Forma Modal

$$2K_{d1} + \sqrt{2}\,K_{d2} = 5$$
$$6K_{d1} + 2\sqrt{2}\,K_{d2} = 44$$

$$K_{d1} = 17;\ K_{d2} = -20.506$$

Por lo tanto las ecuaciones de estado quedan:

$$\dot{x}_m = \begin{bmatrix} -2 & 0 \\ 0 & -3 \end{bmatrix} x_m - \begin{bmatrix} 2 \\ \sqrt{2} \end{bmatrix} [17 \quad -20.506] x_m$$

Utilizando el valor de la matriz T obtenida anteriormente $X_m = Tx$ se llega al sistema físico como:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -2 & 1 \\ 0 & -3 \end{bmatrix} x - \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} [17 \quad -20.506] \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & \sqrt{2} \end{bmatrix} x$$

Esta es la nueva matriz de realimentación de estados

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -2 & 1 \\ 0 & -3 \end{bmatrix} x - \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} [17 \quad -12] x$$

Esta es el comando en Matlab para efectuar realimentación de estados

K=place(A,B,P)

K es el vector de realimentación de estados

Controlador con Seguimiento de Referencia - Forma Canónica Modal

- Procedimiento:

Pasar el sistema a la forma modal y escribir ecuación característica en lazo cerrado

Seleccionar los polos en lazo cerrado λ_d y encontrar la ecuación característica en lazo cerrado $\alpha(s)$

Calcular k_{di} a partir de las ecuaciones características (Permite encontrar K_D)

Encontrar $K = K_D \vec{v}^{-1}$

Control Integral

Observabilidad

Obtención Forma Canónica Observable

Control Integral

- Para tener cero error se agrega control integral:

$$x_I = \int (r - y)dt \ \rightarrow \dot{x}_I = r - y$$

x_I es un nuevo estado, por lo que hemos aumentado el orden del sistema.

- Por convención de signos se define:

$$\dot{x}_I = y - r$$

- Si se quiere agregar un control integral a mas de una variable, se agregan tantos estados extra como variables.

Control Integral

- Sistema en Lazo Abierto:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$
$$y = Cx$$

- Control Integral:

$$\dot{x}_I = y - r = Cx - r$$

- El Sistema completo esta dado por:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ -I \end{bmatrix} r$$

Que es equivalente a:

$$\dot{x}' = A'x' + B'u + G'r$$

Con A' y B' las matrices utilizadas para el diseño del Controlador.

Control Integral

- El sistema en lazo abierto de un sistema con control integral queda:

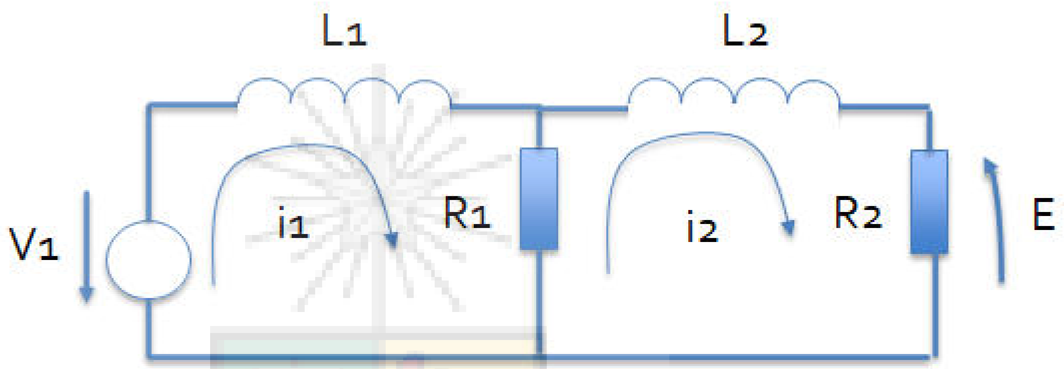
$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ -I \end{bmatrix} r$$

$$\dot{x}' = A'x' + B'u + G'r$$

- Ley de Realimentación:

$$u = -Kx' = -\begin{bmatrix} k_1 & k_2 & \dots k_n & k_{I1} & k_{I2} & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \\ x_{I1} \\ \vdots \end{bmatrix}$$

Ejercicio Propuesto 1



En el sistema mostrado en la figura anterior se requiere controlar E con cero error en estado estacionario a entrada escalón.

Control integral

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_1 \\ \dot{i}_2 \\ \dot{X}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_1/L_1 & R_1/L_1 & 0 \\ R_1/L_2 & -(R_1+R_2)/L_2 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ X_I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1/L_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} v_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -E^* \end{bmatrix}$$

La referencia no afecta la dinámica

Salida del sistema

$$Y = \begin{bmatrix} 0 & R_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ X_I \end{bmatrix}$$

Se obtiene por realimentación de estados

Ejercicio propuesto

- Se asume $R_1 = 10\Omega$, $R_2 = 5\Omega, L_1 = 10mH, L_2 = 15mH.$

$$\begin{bmatrix} \dot{i_1} \\ i_2 \\ X_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1000 & 1000 & 0 \\ 666.67 & -1000 & 0 \\ 0 & 5 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ X_I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -100 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} v_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -E^* \end{bmatrix} \qquad Y = \begin{bmatrix} 0 & 5 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ X_I \end{bmatrix}$$

Vamos a diseñar utilizando la forma canónica de control ayudado por Matlab.

[num,den]=ss2tf(A,B,C,D) entrega un denominador de $s^3 + 2000s^2 + 3.33x10^5 s.$

Por lo tanto la forma canónica de control es:

$$\begin{bmatrix} \dot{i_{c1}} \\ i_{c2} \\ X_{Ic} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2000 & -3.33x10^5 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ X_{cI} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} v_1$$

Son estados “no físicos”

Los polos actuales tienen frecuencias naturales de $[0 \quad -289.1 \quad -29.205]$Hz. Se buscan frecuencias naturales de 150Hz, ζ=0.707 y 150Hz

Ejercicio propuesto

- El nuevo denominador o función característica sería

$$s^3 + 2275.1s^2 + 2.144x10^6 s + 8.3692x10^8$$

$$\begin{bmatrix} \dot{i_{c1}} \\ i_{c2} \\ X_{Ic} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2000 & -3.33x10^5 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ X_{cI} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [K_1 \quad K_2 \quad K_3] \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ X_{cI} \end{bmatrix}$$

Debo llegar acá con realimentación de estados

- $$\begin{bmatrix} \dot{i_{c1}} \\ i_{c2} \\ X_{Ic} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2275 & -2.144x10^6 & -8.3692X10^8 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ X_{cI} \end{bmatrix}$$

- $K_1 = 275.14 \quad K_2 = 1.8107X10^6 \quad K_3 = 8.3692x10^8.$

Ejercicio propuesto

- Recordando la definición de la matriz T tal que $X_c = Tx_f$ es:

- $\mathrm{T} = \mathcal{C}_c\mathcal{C}^{-1} = \begin{bmatrix} -0.01 & 0.015 & -0.001 \\ 0 & -1.5x10^{-5} & 0 \\ 0 & 0 & -3x10^{-6} \end{bmatrix}$. El problema físico con control integral queda:

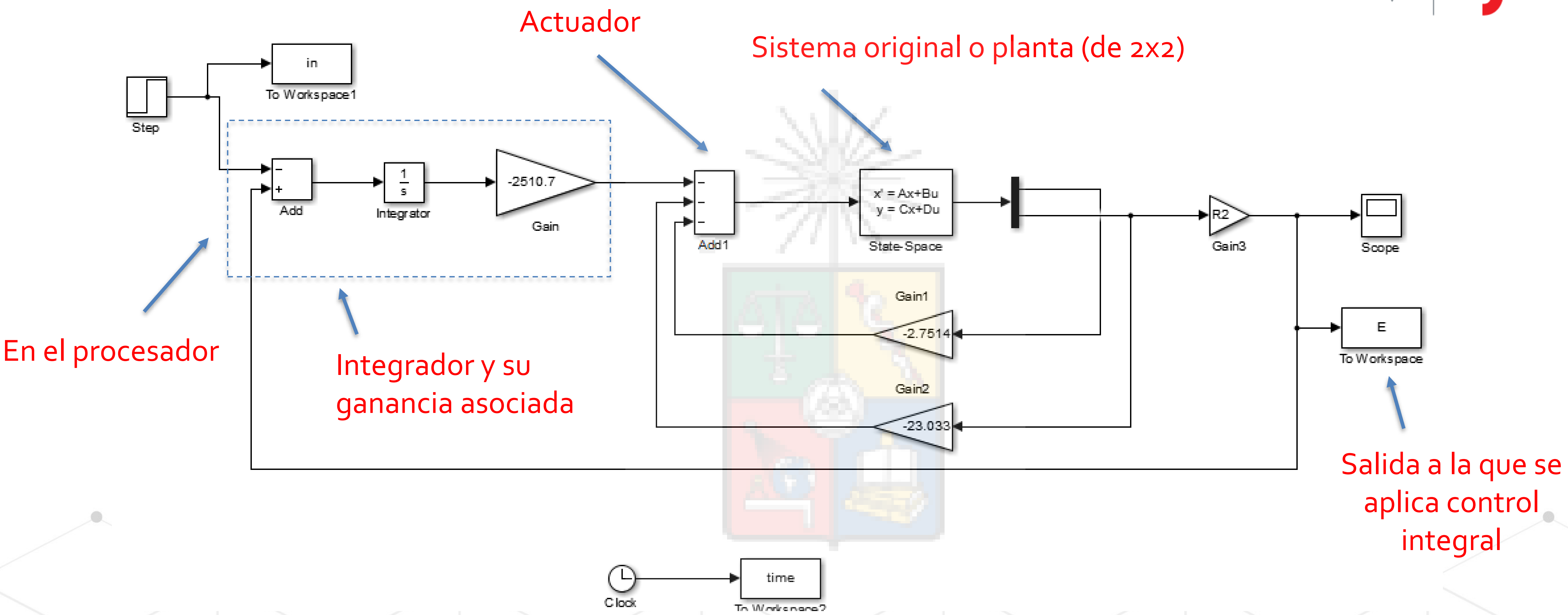
Kc

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_1 \\ i_2 \\ X_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1000 & 1000 & 0 \\ 666.67 & -1000 & 0 \\ 0 & 5 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ X_I \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -100 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [275.14 \quad 1.8107x10^6 \quad 8.3692x10^8] \begin{bmatrix} -0.01 & 0.015 & -0.001 \\ 0 & -1.5x10^{-5} & 0 \\ 0 & 0 & -3x10^{-6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ X_I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -E^* \end{bmatrix}$$

Kf

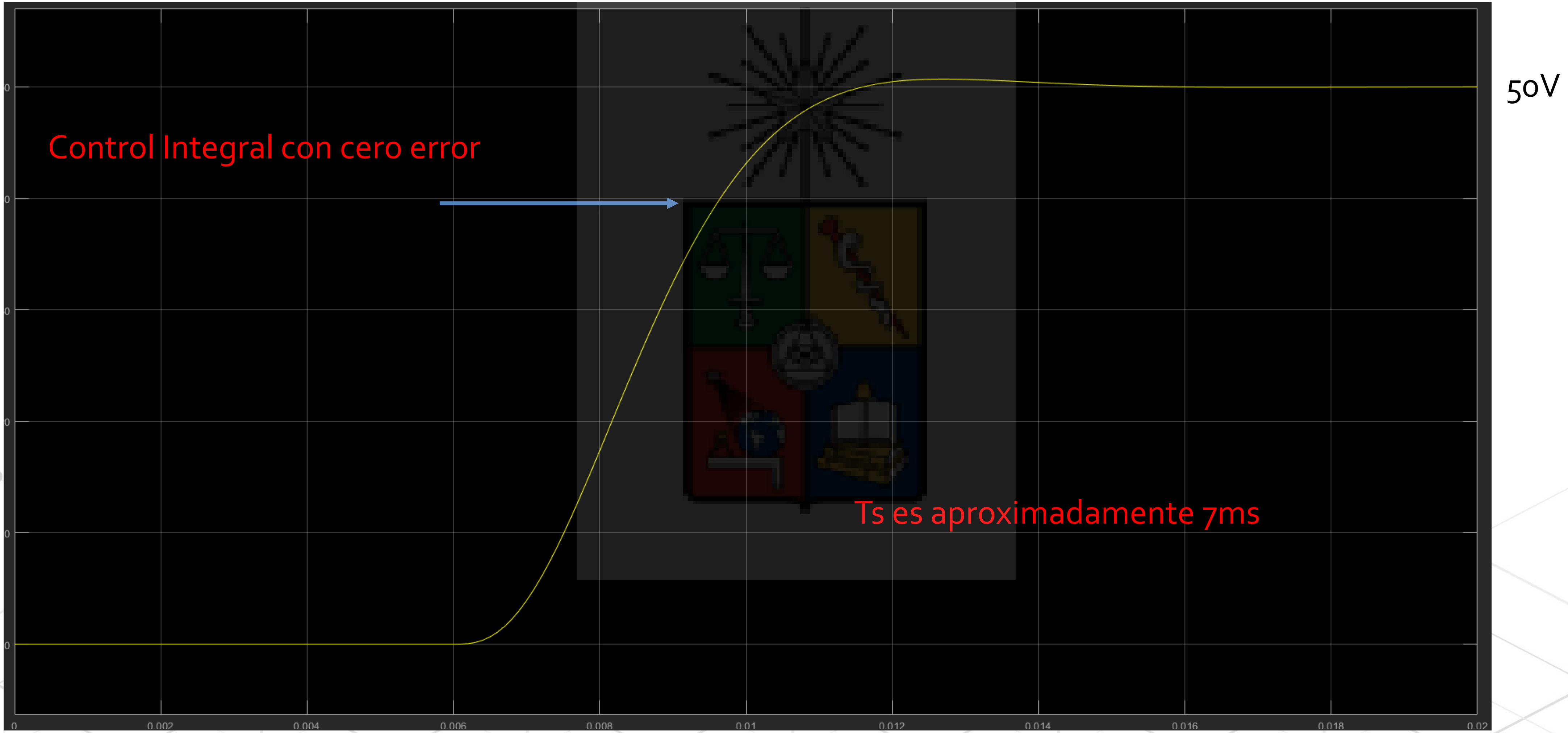
$$\begin{bmatrix} \dot{i}_1 \\ i_2 \\ X_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1000 & 1000 & 0 \\ 666.67 & -1000 & 0 \\ 0 & 5 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ X_I \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -100 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [-2.7514 \quad -23.033 \quad -2511] \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ X_I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -E^* \end{bmatrix}$$

Implementación del sistema de control incluyendo control integral



$$R_1 = 10\Omega, R_2 = 5\Omega, L_1 = 10mH, L_2 = 15mH$$

Salida de Tensión E



Control Integral – Ejemplo Usando forma Modal

- Para el siguiente sistema:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -2 & -1 \\ 0 & -3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix} u$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

- Se quiere tener polos en: $s = -5, s = -2, s = -3$ y cero error en estado estacionario.

Control Integral - Ejemplo

Solución:

- Sistema:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -2 & -1 \\ 0 & -3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix} u$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

- Se define el estado:

$$\dot{x}_I = y - r = x_1 - r.$$

- El sistema aumentado es:

$$\dot{x}' = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2 & -1 & 0 \\ 0 & -3 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} r$$

- La ley de control será:

$$u = -Kx' = -[k_1 \;\; k_2 \;\; k_I]x'$$

Control Integral - Ejemplo

- Sistema aumentado:

$$\dot{x}' = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2 & -1 & 0 \\ 0 & -3 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} r$$

- Usaremos la **forma canónica modal** para la sintonización.
- Luego, se debe pasar el Sistema a la foma canónica modal.
  - Determinación polos:

$$|A - sI| = \left| \begin{bmatrix} -2 & -1 & 0 \\ 0 & -3 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} - sI \right| = \begin{vmatrix} -2-s & -1 & 0 \\ 0 & -3-s & 0 \\ 1 & 0 & -s \end{vmatrix} = (s+2)(s+3)s$$

  - Los vectores propios son:

$$\vec{v}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \vec{v}_2 = \begin{bmatrix} -2 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \vec{v}_3 = \begin{bmatrix} -3 \\ -3 \\ 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \vec{v} = \begin{bmatrix} 0 & -2 & -3 \\ 0 & 0 & -3 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Control Integral - Ejemplo

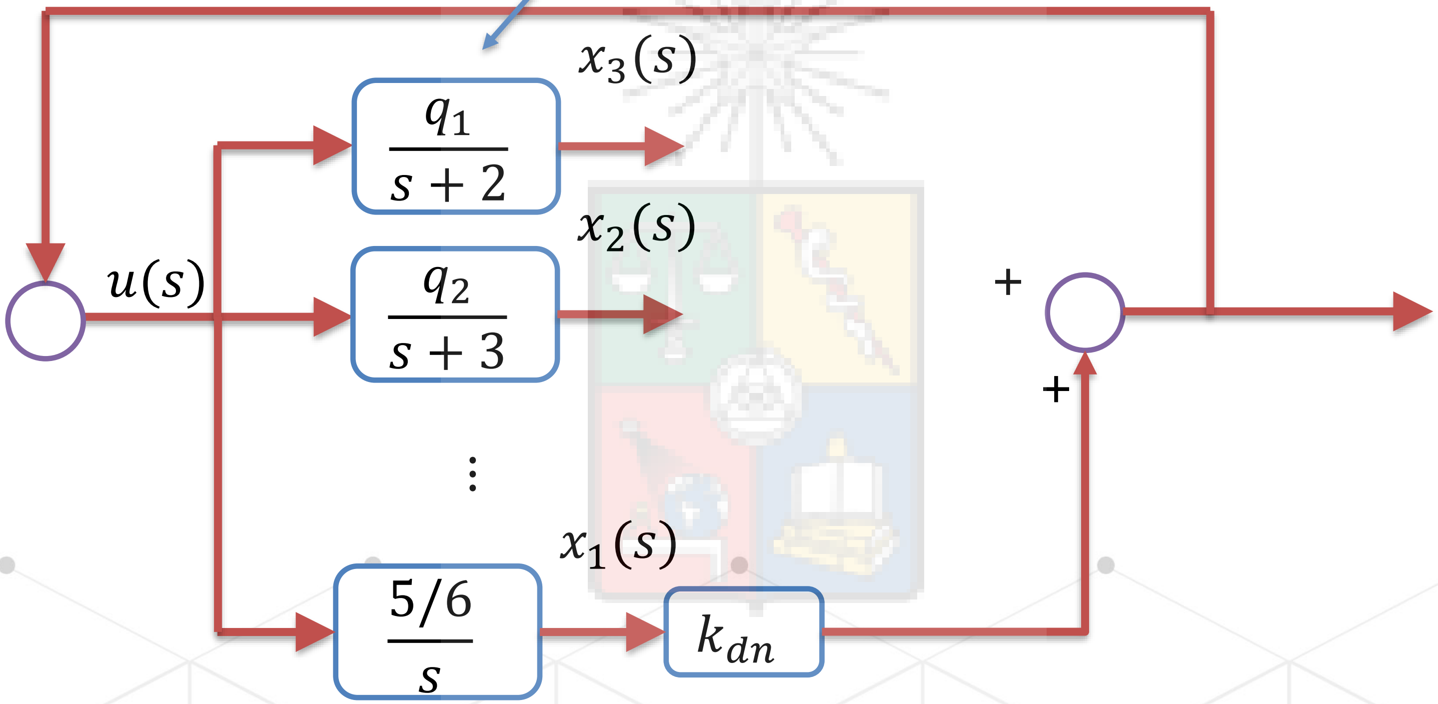
- Pasando a la forma canónica modal se obtiene:

$$\dot{x}'_D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & -3 \end{bmatrix} x'_D + \begin{bmatrix} 0 & -2 & -3 \\ 0 & 0 & -3 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

$$\dot{x}'_D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & -3 \end{bmatrix} x'_D + \begin{bmatrix} \frac{5}{6} \\ -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{3} \end{bmatrix} u$$

- Se quiere llevar los polos a $s = -5, s = -3, s = -2$, por lo que solo se debe cambiar el modo 1.

Estos dos están bien ubicados



Solo éste se debe cambiar

Control Integral - Ejemplo

- Luego:

$$1+\frac{\frac{5}{6}k_1}{s}=0 \rightarrow s+\frac{5k_1}{6}=0$$

- Igualando coeficientes con $s+5=0$:

$$\frac{5k_1}{6}=5 \rightarrow k_1=6$$

- Se obtiene:

$$K_D=\begin{bmatrix}6 & 0 & 0\end{bmatrix}$$

- Volviendo a las coordenadas originales, el controlador es:

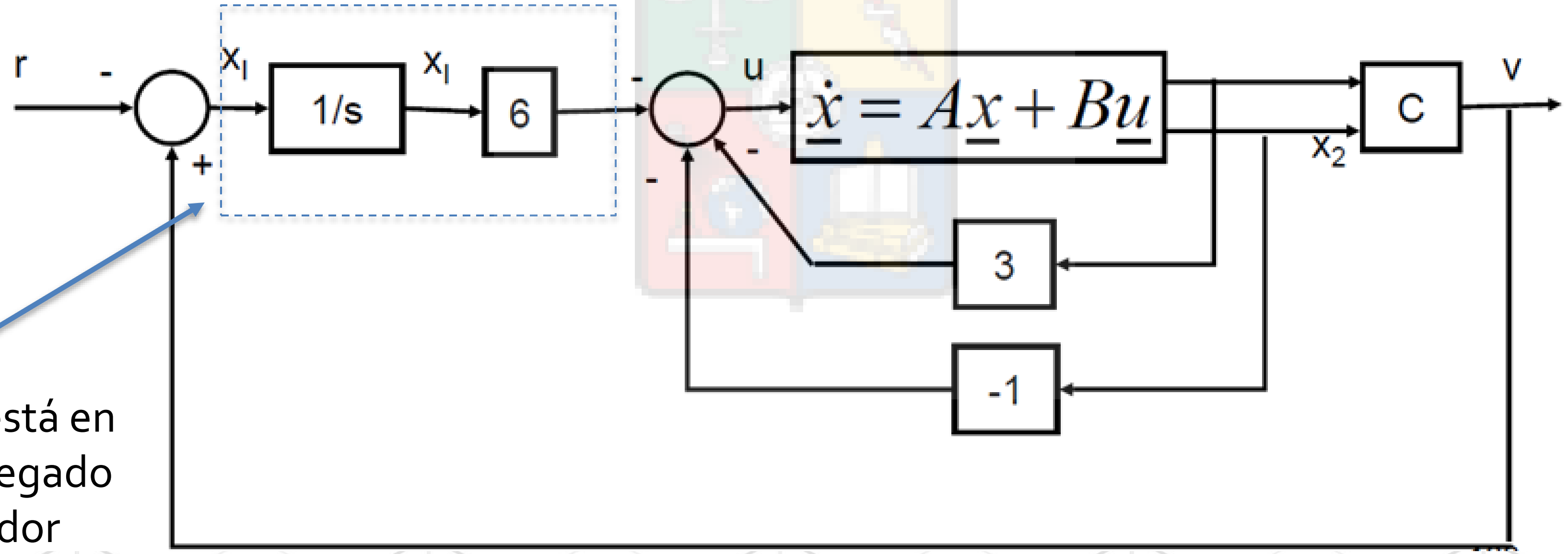
$$K=\begin{bmatrix}6 & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}0 & -2 & -3\\ 0 & 0 & -3\\ 1 & 1 & 1\end{bmatrix}^{-1}=\begin{bmatrix}3 & -1 & 6\end{bmatrix}$$

Control Integral - Ejemplo

- Para el siguiente sistema:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -2 & -1 \\ 0 & -3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix} u$$
$$y = [1\ 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

- El diagrama obtenido es:



Este estado no está en la planta. Es agregado en el procesador

Observabilidad

- Para el sistema dado por:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$
$$y = Cx$$
$$y = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}$$

- Un sistema es observable si el vector de estados puede ser reconstruido a partir de las salidas.

¿Es observable?

- Como x_1 no aparece en las variables de salida el estado no es observable.

¿Qué pasa si la planta no es estable y solo algunos estados son observables?

- Los sistemas pueden ser separados en las partes observables y no observables.

Observabilidad

- Para saber si un sistema es observable se estudia su Matriz de Observabilidad

$$\dot{\mathrm{x}} = \mathrm{Ax} + \mathrm{Bu}$$
$$\mathrm{y} = \mathrm{Cy}$$

$$\mathcal{O} = [C^T \quad A^T C^T \quad (A^T)^2 C^T \quad \dots \quad (A^T)^{n-1} C^T]$$

  - La matriz es cuadrada para sistemas con una salida.
  - Si el rango es menos que el orden del sistema, el sistema no es completamente observable.

Obtención Forma Canónica Observable

- Para pasar el sistema siguiente:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$
$$y = Cx$$

- A la forma canónica observable, se reemplaza:

$$\tilde{x}(t) = Tx(t)$$
$$\widetilde{A} = TAT^{-1}, \widetilde{B} = TB, \tilde{C} = CT^{-1}, \widetilde{D} = D$$

- Con:

$$\widetilde{A} = TAT^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & -a_0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & -a_1 \\ 0 & 1 & & \vdots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 & -a_{n-2} \\ 0 & \dots & 0 & 1 & -a_{n-1} \end{bmatrix}$$
$$\tilde{C} = CT^{-1} = [0 \dots 0 \quad 1]$$

Obtención Forma Canónica Observable

- Luego, la transformación está dada por:

$$\left.\begin{aligned} \mathrm{T\dot{x}} &= \mathrm{TAx} + \mathrm{Tbu} \\ \mathrm{y} &= \mathrm{Cx} + \mathrm{Du} \end{aligned}\right\} \Rightarrow \begin{aligned} \mathrm{\dot{x}_o} &= \mathrm{TAT^{-1}x_o} + \mathrm{TBu} \\ \mathrm{y} &= \mathrm{CT^{-1}x_o} + \mathrm{Du} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \begin{aligned} \mathrm{\dot{x}_o} &= \mathrm{A_o x_o} + \mathrm{B_o u} \\ \mathrm{y} &= \mathrm{C_o x_o} + \mathrm{Du} \end{aligned}$$

- Si λ_i son los valores propios de A, la ecuación característica es:

$$(s-\lambda_1)(s-\lambda_2)\ldots(s-\lambda_n) = 0$$
$$s^n + a_1 s^{n-1} + a_2 s^{n-2} + \cdots + a_n = 0$$

Obtención Forma Canónica Observable

- A partir de $s^n + a_1 s^{n-1} + \cdots + a_n$, se obtiene:

$$A_o = \begin{bmatrix} -a_1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -a_2 & 0 & 1 & \dots & \vdots \\ -a_3 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ \vdots & & & & 1 \\ -a_n & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}, C_o = [1 \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad 0]$$

¿Cómo se encuentra T?

Obtención Forma Canónica Observable

- Determinación de la matriz de transformación $x_o = Tx$

$$\dot{x}_o = TAT^{-1}x_o + TBu$$
$$y = CT^{-1}x_o + Du$$

- A partir de la matriz de observabilidad:

$$\mathcal{O} = [C \quad CA \quad CA^2 \quad \dots \quad CA^{n+1}]^T$$
$$\mathcal{O}_o = [C_o \quad C_oA_o \quad C_oA_o^2 \quad \dots \quad C_oA_o^{n+1}]^T$$
$$\mathcal{O}_o = [CT^{-1} \quad CT^{-1}TAT^{-1} \quad CT^{-1}A_oA_o \dots]^T$$
$$\mathcal{O}_o = [CT^{-1} \quad CAT^{-1} \quad CT^{-1}TAT^{-1}TAT^{-1} \dots]^T$$
$$\mathcal{O}_o = [CT^{-1} \quad CAT^{-1} \quad CA^2T^{-1} \dots]^T$$
$$\Rightarrow T^T\mathcal{O}_o = [CT^{-1}T \quad CAT^{-1}T \quad CA^2T^{-1}T \dots]^T = \mathcal{O}$$

Por lo que:

$$T^T\mathcal{O}_o = \mathcal{O} \Rightarrow T^T = \mathcal{O}\mathcal{O}_o^{-1}$$
$$\Rightarrow \boxed{T = \mathcal{O}_o^{-1}\mathcal{O}}$$

Si el sistema no es totalmente observable
no existe inversa

Obtención Forma Canónica Observable

Pasos para la obtención de la Forma Canónica Controlable:

Determinar $\mathcal{O}$ a partir de A y C

Encontrar la ecuación característica de A

Escribir $\mathrm{A_o}$ y $\mathrm{C_o}$

Determinar $\mathcal{O}_{\mathrm{o}}$

Calcular $\mathrm{T} = \mathcal{O}_{\mathrm{o}}^{-1}\mathcal{O}$

Revisar $\mathrm{C} = \mathrm{C_o}\mathrm{T}$

EL 4004
Fundamentos de Control de Sistemas

Controladores en Variables de Estado