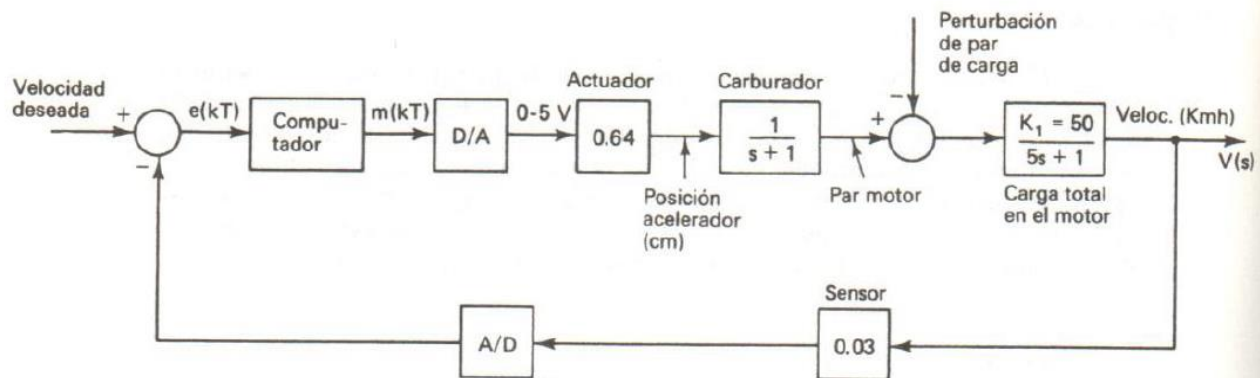


Escuela de Ingeniería Industrial. Universidad de Vigo. Curso 2022-2023.
 Grado en Ingeniería en Electrónica Industrial y Automática
LABORATORIO de INGENIERÍA de CONTROL-2
Práctica 3- I

Análisis Temporal de Sistemas Digitales de Control

Esta práctica explica cómo analizar y diseñar con Matlab sistemas de control digital, con **especificaciones en el dominio del tiempo**. Considerar como ejemplo un sistema de control de velocidad de crucero de un automóvil:



En ausencia de perturbaciones, la planta es $P(s)=6.4/(s+1)/(s+0.2)$. Supongamos que la ganancia 0.03 la cancelamos por software. Nos quedaría un sistema típico con lazo abierto $L(z)=D(z)*G(z)$, con $D(z)$ el regulador digital y $G(z)$ la planta muestreada con ZOH (D/A):

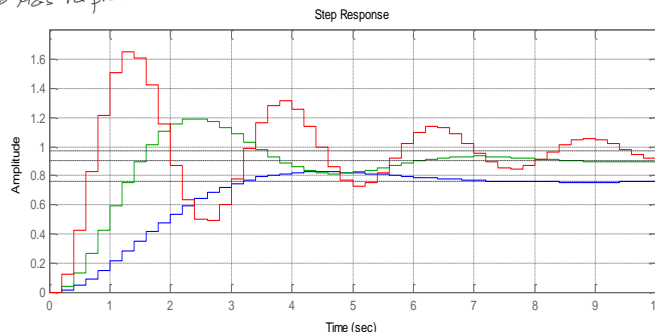
```
s=tf('s'); Ts=0.2; P = 6.4/(s+1)/(s+0.2);
G= c2d(P,Ts,'zoh'); zpk(G)
Zero/pole/gain: 0.11827 (z+0.9231)
(z-0.9608) (z-0.8187)
```

Vemos que la planta $G(z)$ tiene **un cero** y **dos polos reales**, **uno lento (dominante)** y **otro más rápido**. **¿Cuál es el dominante?** Una posible estrategia de diseño sería **comenzar por un regulador proporcional $D(z)=K$** , **visualizar la gama dinámica alcanzable variando K** y, a continuación, tratar de mejorarla con un PI, PD ó PID. Empezamos probando tres ganancias:

```
T1= feedback(0.1*G, 1); T2= feedback(0.3*G, 1);
T3= feedback(1.0*G, 1); step(T1,T2,T3, 10); grid
```

T1 → Más rápida

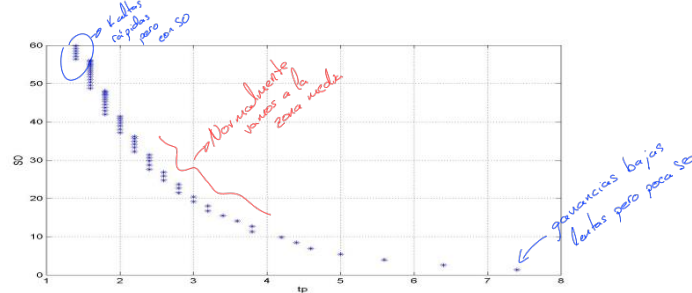
T_1 —
 T_2 —
 T_3 —
 ↓
 no me aparece amarillo



→ Normalmente a + K → 50

Vemos que (además de un problema de precisión estacionaria, que solucionaremos con un PI) hay un compromiso entre velocidad de respuesta y robustez, que se explica con el LR (\gg rlocus(G), discutir el porqué). Este compromiso puede representarse dibujando tiempo de pico t_p contra sobreoscilación SO , para un rango de K 's:

```
tp=[ ]; SO=[ ];
for K=(0.05: 0.01 : 0.75),
    info= stepinfo( feedback(K*G, 1));
    SO = [SO; info.Overshoot];
    tp = [tp; info.PeakTime];
end;
figure(3); plot(tp,SO,'*'); grid;
xlabel('tp'); ylabel('SO');
```



El control proporcional tiene por tanto problemas de estacionario (error permanente) y de transitorio (limitaciones en (tp,SO), comentar la gráfica). Podríamos introducir mejoras cambiando a un PD ó PI. Sería buena idea probar un PI (mejor que un PD) ¿Por qué? Postulemos un PI, que discretizando por derivadas hacia atrás resulta:

$$D(z) = K_p + K_i \cdot T_s \cdot z / (z-1) = K_{pi} \cdot (z - c) / (z - 1) = \boxed{(A \cdot z + B) / (z - 1)}$$

$\frac{1}{s} = \frac{T}{s} \cdot \frac{1}{1 - e^{-sT}}$ Da igual cual pongas pero si tienes un PI, vas a tener un polinomio de grado 1 en el numerador

Ahora tenemos dos grados de libertad, y podemos plantear dos objetivos de diseño: t_p, SO . Para elegir (t_p, SO) observemos los valores de la gráfica previa, pero teniendo en cuenta que la acción integral $1/(z-1)$ ahora lentificará la respuesta. Elijamos entonces, p.ej.:

Tiempo de pico $t_p = 4$ seg.,

Sobreoscilación $SO = 0.20 = 20\%$

¿Qué implicaría $SO = 0.20$ si, por ejemplo, el vehículo va a 100 km/h y le aplicamos un escalón de +20 km/h? Para determinar los polos de lazo cerrado que cumplen esas especificaciones (t_p, SO) primero se localizan en continuo (plano s) y después se pasan a discreto (plano z) mediante $z = \exp(s \cdot T_s)$.

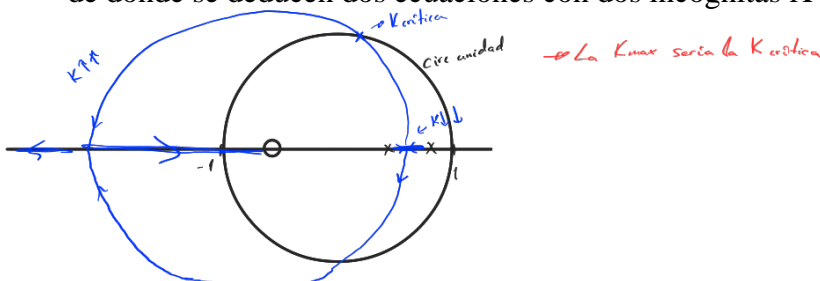
```
tp=4; SO=0.20; wd= pi/tp; sigma= -log(SO)/tp;
s1= -sigma+ i*wd; s2= conj(s1);
p1= exp(Ts*s1); p2= conj(p1);
```

Para colocar dos polos de lazo cerrado en esas posiciones se puede usar alguna técnica del LR (condición de fase y módulo, etc). Otra alternativa se basa en que en LC debe cumplirse $1 + D(z)G(z) = 0$ para $z = p_1, p_2$. Esto equivale a que $1 + G(z) \cdot (A \cdot z + B) / (z - 1) = 0$, es decir

$$z \cdot A + B = (1 - z) / G(z)$$

$$\text{para } z = p_1, \quad z = p_2,$$

de donde se deducen dos ecuaciones con dos incógnitas $X = (A, B)$ que se resuelven así:



```

z= tf('z',Ts);
M = [ p1, 1;
      p2, 1];
N = [ evalfr( (1-z)/G, p1 );
      evalfr( (1-z)/G, p2 )];
X= inv(M)*N;  X= real(X);  A= X(1);  B= X(2);

```

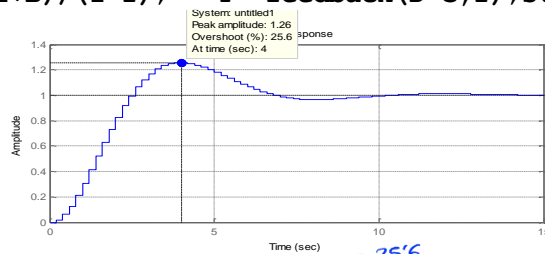
Código 2 ec y 2 incog

Dando como resultado $A=0.1373$, $B=-0.1298$. Solo queda verificar la respuesta

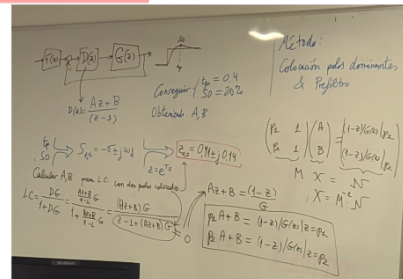
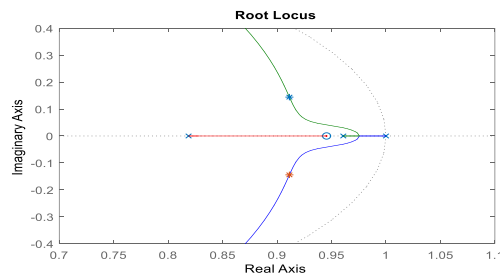
```

D= (A*z+B)/(z-1);  T= feedback(D*G,1); step( T, 15); grid

```



Vemos que la SO es algo mayor de 20. Antes de arreglarlo, hay que comentar que al menos salió estable ($\gg \text{isstable}(T)$). Si forzamos mucho los objetivos, por ejemplo $tp=4$, $SO=10$, el resultado sale inestable (no todas las especificaciones son alcanzables). Dibujemos el LR:



Vemos que pasa por los polos deseados p_1, p_2 (*), pero hay raíces no deseadas (Cuales?). Para arreglarlo, diseñamos un prefiltro $F(z)$. Primero obtenemos el L.C. (de orden 2) buscado:

```

wn = sqrt( sigma^2 + wd^2 );
zeta= cos(atan(wd/sigma));
LC2s= wn^2/( s^2 + 2*zeta*wn*s + wn^2 );
LC2z= c2d( LC2s, Ts, 'zoh' );

```

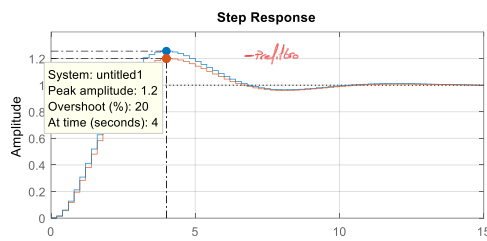
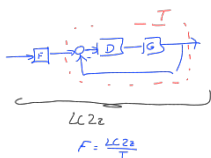
A continuación, planteando $LC2(z)=F(z)*T(z)$, se llega al prefiltro $F(z)=LC2(z)/T(z)$:

```

F = LC2z/T;  F=minreal(F);  zpk(F),
0.90724 (z+0.9477) (z-0.9406)
-----
(z-0.9455) (z+0.9231)

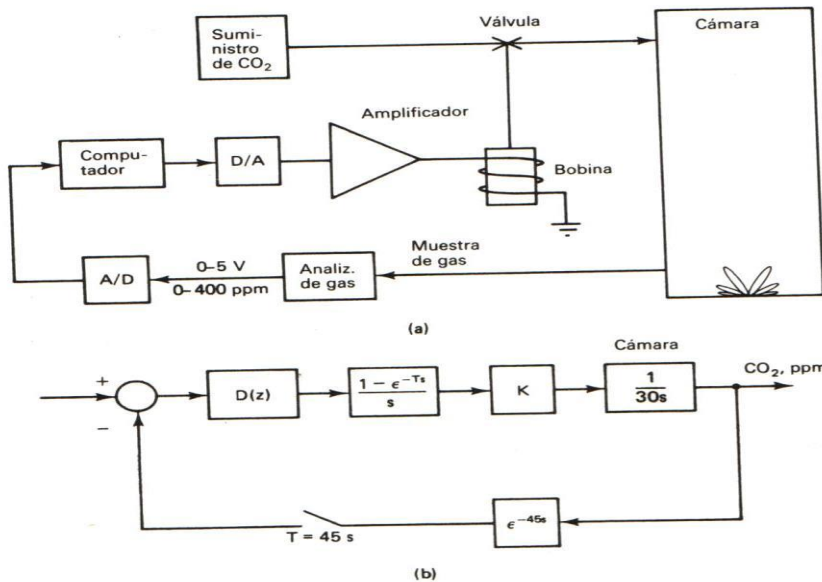
```

¿Cuál es la función de 'minreal'? Chequeamos que F sale estable (podría no serlo) y ya podemos hacer la comprobación final $\gg \text{step}(T, F*T, 15); \text{grid}$



Trabajo en Laboratorio

Considerar el siguiente sistema de control de CO₂ de un invernadero:



Modelado: Este sistema ya fue estudiado en la práctica frecuencial, donde se probó que en tiempo discreto ($T_s=45$) puede modelarse como un lazo con tres bloques:

$$D(z), \quad G(z) = K_g / (z - 1), \quad H(z) = 1/z.$$

La realimentación contiene a $H(z)$ y el camino directo contiene al regulador $D(z)$ y a la planta $G(z)$. La planta ya tiene una acción integral, por lo que podemos analizar reguladores P y PD.

En la práctica se indicará cómo generar, en base al dni, tres números r_1, r_2, r_3 .

Tomar como planta discreta $G(z) = K_g / (z-1)$:

$$\begin{array}{lll} r_1=1 & r_1=2 & r_1=3 \\ G(z) = 0.75/(z-1), & G(z) = 1.00/(z-1), & G(z) = 1.25/(z-1) \end{array}$$

Control proporcional: Para $D=K$, Visualizar los gráficos siguientes y extraer conclusiones:

- Dibujar el LR ($\gg \text{rlocus}(G*H)$)
- Obtener $\gg \text{step}(\text{feedback}(K*G, H))$ para varios valores de 'K', dentro del rango estable, para ver la gama dinámica alcanzable variando 'K'.
- Para $K=(K_{\min}: dK : K_{\max})$ hacer un gráfico de t_p (horiz.) contra SO (vert.), similar al de la pág.2, buscando un rango $K=(K_{\min}: dK : K_{\max})$ adecuado.

Control PD. Para $D=(A*z+B)/z$. Considerar las posibles especificaciones (t_p, SO), dadas en forma de tabla, según los valores de r_2, r_3 :

		$r_3=1$	$r_3=2$	$r_3=3$
$r_2=1$	$t_p = 135s. = 3T_s$,	$SO=0.20$,	$SO=0.15$,	$SO=0.10$
$r_2=2$	$t_p = 180s. = 4T_s$,	$SO=0.10$,	$SO=0.08$,	$SO=0.06$
$r_2=3$	$t_p = 225s. = 5T_s$	$SO=0.04$,	$SO=0.03$,	$SO=0.02$

Elegir una de las 9 opciones anteriores y repetir el diseño del ejemplo, en particular:

- Obtener polos L.C deseados, en s ($s=s_1, s_2$) y en z ($z=p_1, p_2$)
- Calcular $Az+B$ con la condición de que el LC tenga polos en $z=p_1, p_2$ (*)
- Hacer el lugar de raíces ($\gg \text{rlocus}(D*G*H)$)
- Verificar la respuesta a escalón ($\gg \text{step}(\text{feedback}(D*G, H), 1200)$)
- Diseñar, si fuera necesario, un prefiltro F

(*)Nota para el punto 2°:

$$0=1+D*G*H \quad \rightarrow \quad 0 = 1 + ((Az+B)/z) * (Kg/(z-1)) * (1/z)$$

$$\rightarrow (Az+B) = -z^2*(z-1)/Kg \quad \text{para } z=p_1, z=p_2, \quad (Kg=0.75, 1 \text{ ó } 1.25).$$

Contenido de la hoja de resultados (máximo dos carillas) :

Apellidos y nombre:

DNI=

r1=

r2=

r3=

G(z)=

tp =

SO=

Control P:

Dibujo aproximado del LR y del Gráfico de especificaciones

Control PD:

$s_1, s_2=$

$p_1, p_2=$

A,B=

D(z)=

Dibujo aproximado de la respuesta a escalón

Dibujo aproximado del LR

Breve discusión de si es necesario o no añadir prefiltro,
y resultado final si se aplica (resp. escalón)