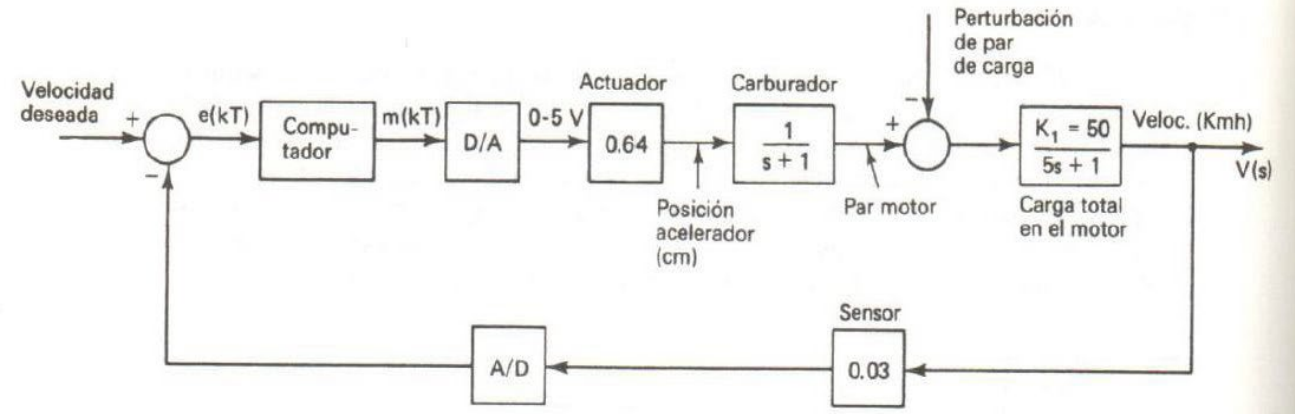
LABORATORIO de INGENIERÍA de CONTROL-2

Práctica 3-II

Análisis Frecuencial de Sistemas Digitales de Control

En esta práctica se explica cómo analizar en frecuencia, con Matlab/Simulink, sistemas de control digital. Primero se desarrolla un ejemplo y a continuación se plantea un problema.

Considerar como ejemplo el siguiente sistema de control de velocidad de crucero de un automóvil (Libro de Phillips y Nagle, *"Sistemas de Control Digital"*):



En ausencia de perturbaciones, la planta P(s)=6.4/(s+1)/(s+0.2) tiene dos etapas, el actuador-carburador 0.64/(s+1) y el chasis 10/(s+0.2). El sistema de control está formado por el controlador D(z), la planta P(s), el sensor H(s)=0.03 y los convertidores AD y DA. El modelo muestreado en L.C., desde la secuencia de referencia hasta la velocidad muestreada, es:

$$T(z) = D(z) * \mathcal{Z}_{zoh}[\ P(s)\ ] \ / \ \{ 1 + D(z) * \mathcal{Z}_{zoh}[\ P(s) * H(s)\ ] \ \}.$$

El siguiente código declara P(s), obtiene la planta G(z) (muestreada con ZOH), y las F.T. de lazo abierto L(z) y cerrado T(z) (el periodo es Ts=0.2seg):

```
s = tf('s');
Ts=0.2; z = tf('z',Ts);
P = 6.4/(s+1)/(s+0.2);
G= c2d(P,Ts,'zoh');
D = 1;    H = 0.03;
L = D*G*H;
T= feedback( D*G, H);
```

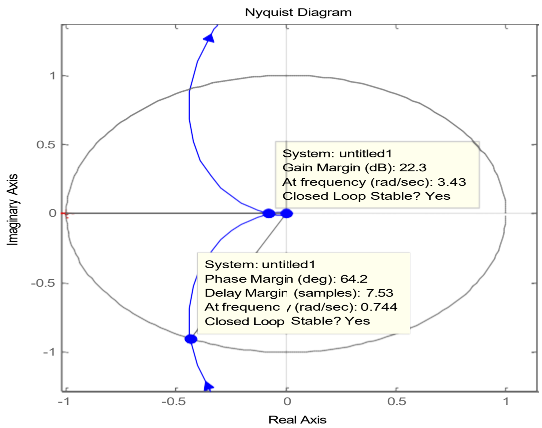
El comando clave es 'c2d' (con opción 'zoh') ¿Cómo se obtendría sin este comando?

El lazo cerrado resultante (a continuación)… ¿es estable?

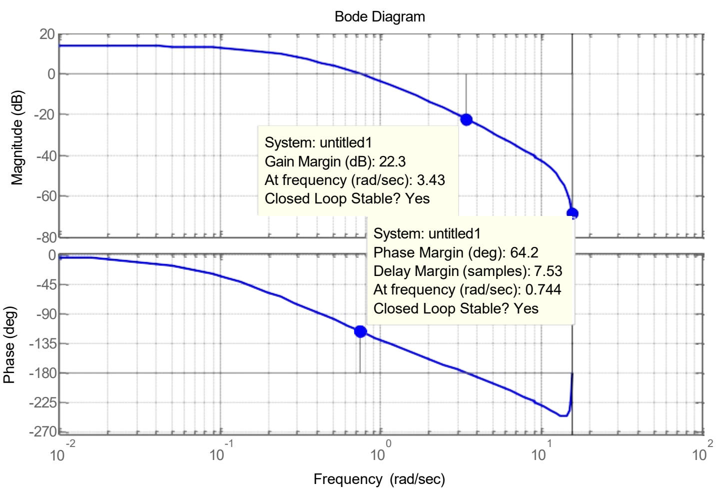
```
>> zpk(T)
Zero/pole/gain:
  0.11827 (z+0.9231)
--------------------
(z^2 – 1.776z + 0.7899)
```

Una vez pasado el sistema a tiempo discreto, podemos analizarlo desde el punto de vista frecuencial o temporal (o ambos). En esta práctica lo analizamos **frecuencialmente**. En primer lugar, puede verse que el ajuste unitario D=1 no es muy bueno, porque (>>nyquist(L)) los márgenes son demasiado robustos (MF=∞, MG=82dB) y como consecuencia la respuesta (>>step(T)) es demasiado lenta.

Tanteando un poco controladores proporcionales enseguida se llega a valores más razonables, por ejemplo, para D=K=5, obteniendo ahora >>nyquist(5*L):



Con el botón derecho se accede a los márgenes de ganancia y fase y a sus frecuencias asociadas. Otro comando frecuencial importante es 'bode': >> bode(5*L)



¿Cuál es la frecuencia máxima mostrada en el Bode? Para los márgenes, se puede aplicar

>> [MG, MF, Wmg, Wmf]=margin(5*L)

Recordar las definiciones de MG y MF. El comando 'margin' debe usarse con cuidado, porque devuelve valores para MG,MF aunque el sistema sea inestable. Se debe chequear

>> isstable(feedback(5*G,H))

Solo en el caso de lazos estables tiene sentido usar márgenes como medida de robustez.

El ***diseño*** frecuencial debe formular, con especificaciones adecuadas, el compromiso que siempre hay entre velocidad de respuesta y robustez (normalmente si aumentamos rapidez, perdemos robustez). En frecuencia, la velocidad de respuesta está asociada a las frecuencias Wmg,Wmf, que deberían ser grandes. La robustez está ligada a los márgenes MG,MF. Una formulación concreta podría ser:

Maximizar: Wmf   Variando D=K   Restringido a: MF>50

Un código sencillo que determina la D=K óptima (en un rango [Kmin, Kmax]) sería:

```
MFmin=50;   Kmin=3;  Kmax=10;
Wopt=0;
for K= Kmin: 0.1 :Kmax,
    D=K; L=D*G*H;  T=feedback(D*G, H);
    [MG,MF,Wmg,Wmf]=margin(L);
    if Wmf>Wopt & MF>MFmin & isstable(T),
       Wopt= Wmf; Kopt=K;
    end;
end;
Wopt, Kopt,  Dopt=Kopt;
Lopt=Dopt*G*H;  Topt= feedback(Dopt*G, H);
figure(1); nyquist(Lopt);
figure(2); bode(Lopt);
figure(3); step(0.03*Topt);
```

Interpretar las tres figuras conseguidas. Chequear que MF>50. ¿Por qué es mejor escalar por 0.03 la respuesta a escalón en lazo cerrado? ¿Tiene error permanente nulo?

Para mejorar el diseño, se podrían plantear reguladores tipo PI ó PD, que tienen el formato (discretización por derivadas hacia atrás):

PI: $D(z) = Kp + Ki*Ts*z/(z-1) = K*(z-c)/(z-1)$

PD: $D(z) = Kp + Kd*(z-1)/z/Ts = K*(z-c)/z$

En esta aplicación concreta, como la planta no tiene acción integral, sería conveniente que el controlador la tuviera, por eso es más aconsejable elegir un PI que un PD. ¿Con qué aspecto de la respuesta a escalón está relacionada esta elección de PI?

En cualquier caso, al usar dos grados de libertad (K,c) siempre será posible superar al diseño de un grado de libertad (K), es decir conseguir mayor rapidez y una Wmf mayor. Decir por qué la solución a:

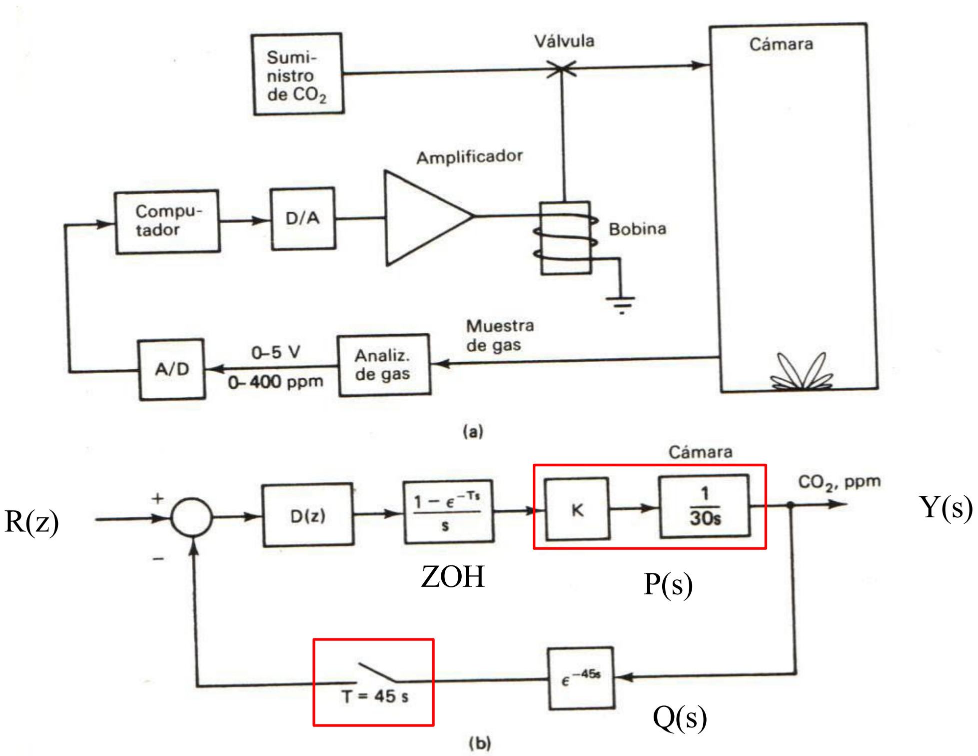
Maximizar: Wmf   Variando D=K(z–c)/(z–1)   Restringido a: MF>50

obtiene una Wmf superior (o igual) al diseño proporcional D=K.

¿Cómo se modificaría el código para calcular el PI?

Trabajo en Laboratorio

Considerar el sistema de control de $CO2$ de un invernadero (Phillips y Nagle, *Sistemas de Control Digital*), dado por los esquemas de abajo.



La característica más destacable de este sistema es el sensor de CO2, un analizador de gas que toma muestras de aire y tarda un tiempo (45s) en devolver el contenido de CO2. Por este motivo, se propone un periodo de muestreo Ts igual al retardo del sensor, lo que implica que el sensor Q(s)=exp(−Ts*s) retrasa un periodo, lo que equivale a H(z)=z^(−1)= (1/z).

Ts = 45 s. Q(s) → H(z) = 1/z

El actuador es una válvula, controlada desde el sistema digital, que regula el aporte de CO2 (caudal) desde una bombona. El conjunto actuador-planta tiene FdT P(s) = (K/30)/s. El coeficiente K depende de la válvula y el (1/30) está asociado al volumen del invernadero.

Apartado 1. Modelado.

Demostrar que la salida muestreada Y(z) depende de R(z) a través de la FdT de lazo cerrado:

$$\frac{D(z) * \; Z[\; zoh \; * \; P(s) \;]}{1 \; + \; D(z) \; * \; Z[\; zoh \; * \; P(s) \; * \; Q(s) \;]}$$

que toma la forma particular D(z)*G(z) / [1 + D(z) * G(z) * H(z)], donde

G(z) = p/ (z−1) H(z) = 1/ z

donde G(z)=Z[zoh P(s)], y el número 'p' es un coeficiente constante.

Datos particulares personalizados.

En la práctica se indicará cómo generar, en base al dni, tres números r1, r2, r3.

Tomar como planta discreta:

Si r1=1,	$G(z)= 0.75/(z-1)$,	Si r1=2,	$G(z)= 1.00/(z-1)$,
Si r1=3,	$G(z)= 1.25/(z-1)$,	Si r1=4,	$G(z)= 1.50/(z-1)$,

Fijar como margen de fase mínimo:

Si r2=1,	MFmin= 40º,	Si r2=2,	MFmin= 50º,
Si r2=3,	MFmin= 60º,	Si r2=4,	MFmin= 70º.

Fijar como margen de ganancia mínimo:

Si r3=1,	MGmin=2.0 (6dB),	Si r3=2,	MGmin= 2.51 (8dB),
Si r3=3,	MGmin=3.16 (10dB),	Si r3=4,	MGmin= 4.0 (12dB).

Apartado 2

Diseñar un controlador proporcional $D(z)= K$ con el objetivo:

Maximizar: Wmf, Variando D=K Restringido a: MF>MFmin, MG> MGmin

Apartado 3

Diseñar un controlador tipo PD: $D(z)= K(z-c)/z$, con el objetivo:

Maximizar: Wmf, Variando K,c Restringido a: MF>MFmin, MG> MGmin

Contenido de la hoja de resultados:

Apellidos y nombre: DNI=

r1= r2= r3=

G(z)= MGmin = MFmin=

Apartado 1: Breve demostración de la FdT de lazo cerrado (máx. 1/3 página)

Apartado 2: Dopt(z) = Kopt= Wmf, MF, MG

Apartado 3: Dopt(z) = Kopt*(z-copt)/z= Wmf, MF, MG

Código del apartado 3 (parte principal del código, máx. 1/3 pág.)