

Capítulo 7

Estudio experimental de las estrategias de control

7.1 Estudio de las estrategias de control

Una vez obtenida la función de transferencia del sistema en lazo abierto, se puede proceder al estudio de las estrategias de control con mayor conocimiento. El control de sistemas desconocidos (tipo caja negra) es mucho mas difícil que el de sistemas conocidos.

Los motivos por los que se obtuvo la función de transferencia son varios. El objetivo principal es que se desea tener una descripción matemática del sistema. Además, con esta descripción es posible simular diferentes estrategias de control mediante la herramienta Simulink de Matlab. Este enfoque permite probar rápidamente diferentes estrategias de control y evitar situaciones peligrosas.

Tal y como se explicó en el apartado 6.2 *Estimación de la función de transferencia*, el sistema modelizado fue el siguiente:

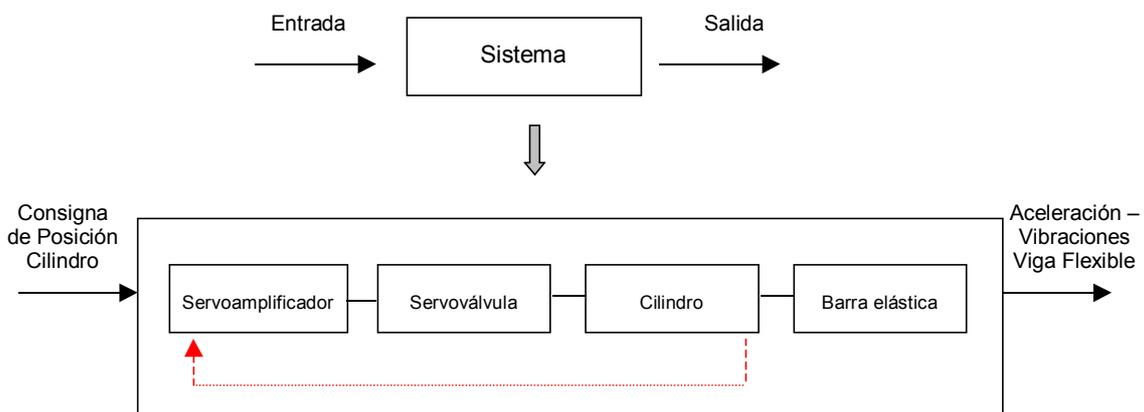


Figura 7.1 Diagrama de bloques

Para realizar estos estudios se parte de la condición previa de que el control de la posición del cilindro ya está ajustado correctamente en los diferentes lazos de control que incluye la servoválvula. Esto significa que si se introduce una señal de consigna a la

servoválvula, o más concretamente a su servoamplificador, se consigue que el servocilindro se sitúe en la posición correcta con excelente precisión.

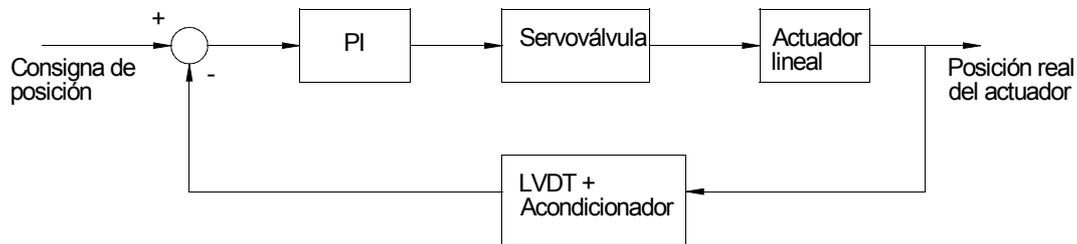


Figura 7.2 Diagrama de bloques detallado

7.1 Objetivo del sistema de control

Para poder decidir honradamente qué estrategia de control es la que mejor ajusta el comportamiento del sistema a los objetivos definidos, es necesario definir primero los objetivos.

El objetivo será controlar el posicionamiento de un punto de la barra elástica intentando eliminar los errores de posicionamiento debidos a las vibraciones que se producen en ella debido a su comportamiento como sólido elástico. En otras palabras, se desea que el sistema o estrategia de control sea capaz de transformar el comportamiento elástico del sólido flexible en un comportamiento que sea lo más rígido posible sin sacrificar la velocidad del desplazamiento.

La señal de consigna de posición que se aplicará al sistema será un escalón de subida.

7.3 Montaje del sistema de control

Antes de pasar a describir las estrategias de control estudiadas, se describirá el montaje utilizado para realizar el control, así como el papel que juega el PC en este caso en comparación con el montaje realizado anteriormente para la obtención de la función de transferencia.

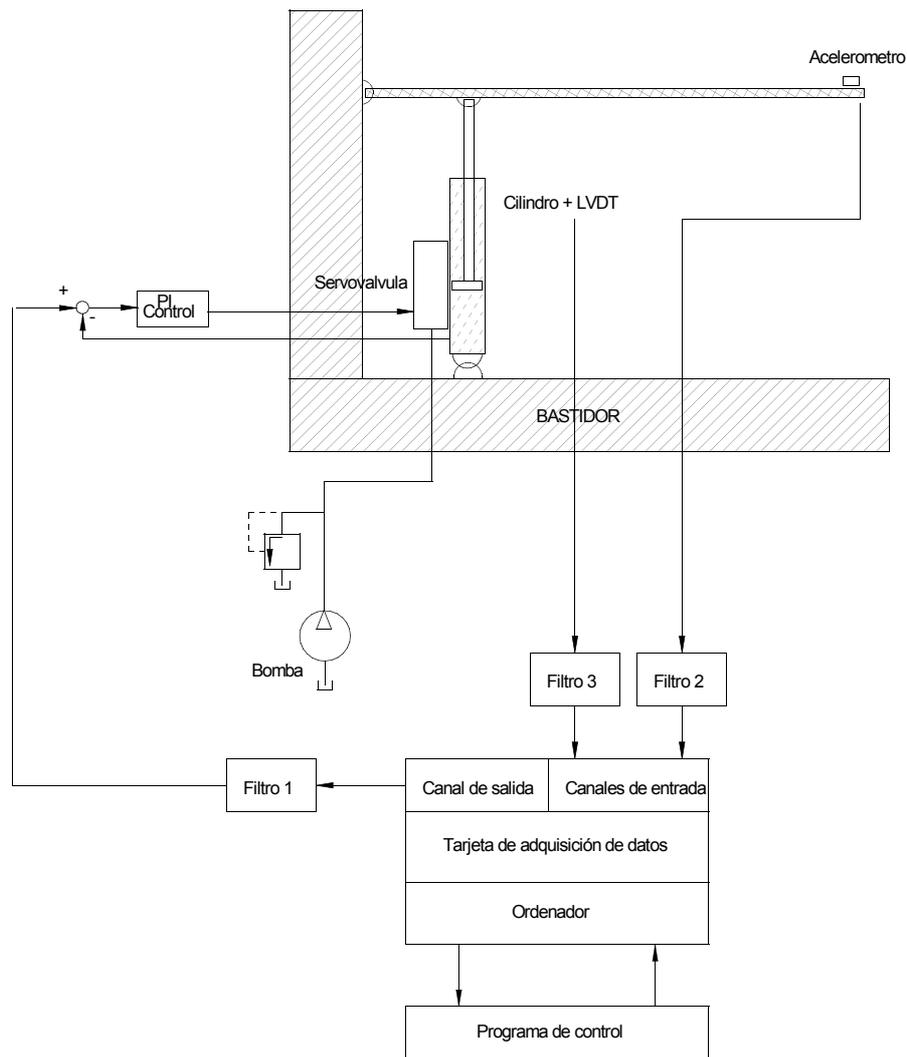


Figura 7.3 Diagrama del sistema

La Figura 7.3 muestra el diagrama del sistema utilizado para controlar la viga flexible. Aparentemente no hay diferencias con respecto al esquema realizado para la captura de datos que fue utilizado para el estudio de la función de transferencia. *La principal diferencia está en el modo en el que el ordenador hace el tratamiento de datos.*

Mientras que, en el primer montaje, el tratamiento de datos se realiza una vez se ha completado la adquisición de éstos, en el caso actual el tratamiento de datos debe hacerse en tiempo real ya que es el PC el encargado de realizar el control del sistema. Esto implica que cada una de las estrategias de control ha de ser programada mediante LabVIEW. Ciertamente

es una decisión arriesgada pues Windows no es el mejor entorno para programar en tiempo real. Sin embargo, se ha optado por esta opción debido a la enorme flexibilidad de programación que ofrece el entorno LabVIEW.

Un aspecto importantísimo, consecuencia de la decisión anterior, es que el sistema de control (aplicación LabVIEW) debe trabajar en tiempo real. Esto implica que el bucle de cálculo de las estrategias de control debe ser lo suficientemente rápido como para permitir un control óptimo sobre el sistema. En caso de que el bucle de cálculo fuese demasiado lento debido a un exceso de operaciones en dicho bucle (por ejemplo, existencia de filtros de orden demasiado elevado) o una excesiva lentitud del PC, tendríamos un sistema de control inestable e incapaz de controlar el comportamiento del sistema.

7.4 Comportamiento del sistema en lazo abierto

Antes de entrar en detalle en la descripción y la valoración de las estrategias de control aplicables al sistema, lo primero que se debe realizar es un estudio del comportamiento del sistema en lazo abierto. Así se obtendrá una referencia con la que poder comparar el comportamiento del sistema controlado mediante las diferentes estrategias.

El sistema se ensayará bajo la acción de una entrada escalón positiva que actuará como consigna de posición de la barra elástica.

Antes de observar el comportamiento real del sistema, se ha ensayado cual es la respuesta simulada del modelo. Para ello, se ha utilizado la toolbox Simulink de Matlab. Este ha sido el modelo con el que se trabajó:

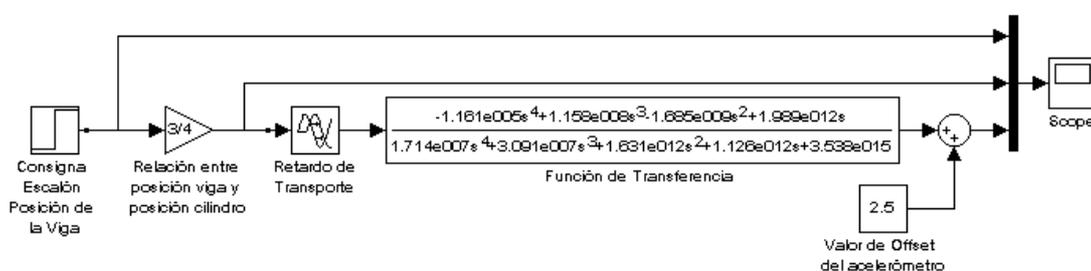


Figura 7.4 Modelo Simulink lazo abierto

En el diagrama se puede observar como se introduce una señal de consigna escalón que refleja la posición a la que se desea colocar un punto de la viga, en el que está montado el acelerómetro. Hay que adaptar esta consigna de la viga a la entrada del servoamplificador. Se ha escogido trabajar en modo relativo, es decir, el máximo posible en la consigna de la viga provocará el máximo desplazamiento en el cilindro, para conseguir el máximo desplazamiento de la viga.

El rango de trabajo del sensor de posición LVDT (y por tanto el rango de entrada del servoactuador) está reflejado en el siguiente esquema, en el que se indican los niveles de tensión que ofrece el sensor asociados a la posición del vástago:

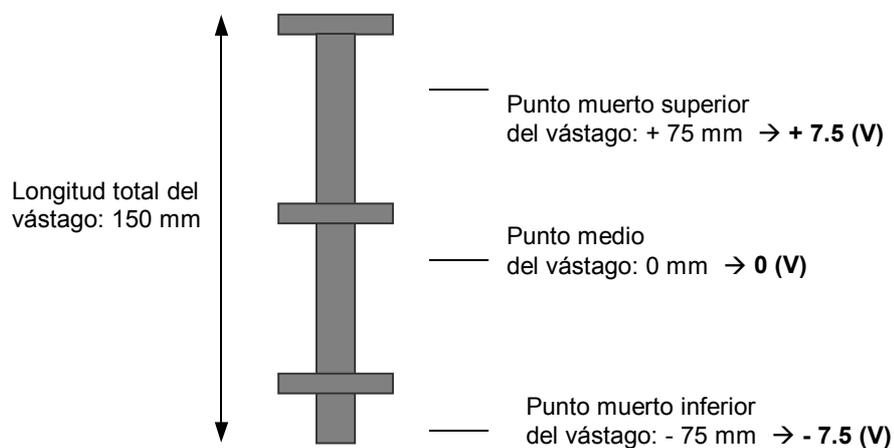


Figura 7.5 Respuesta del LVDT

Es decir, cuando el cilindro está situado en su posición superior máxima (punto muerto superior), el sensor de posición LVDT ofrece un valor de tensión de **+7.5 V**. En cambio, cuando está situado en su posición inferior, ofrece un valor de **-7.5 V**.

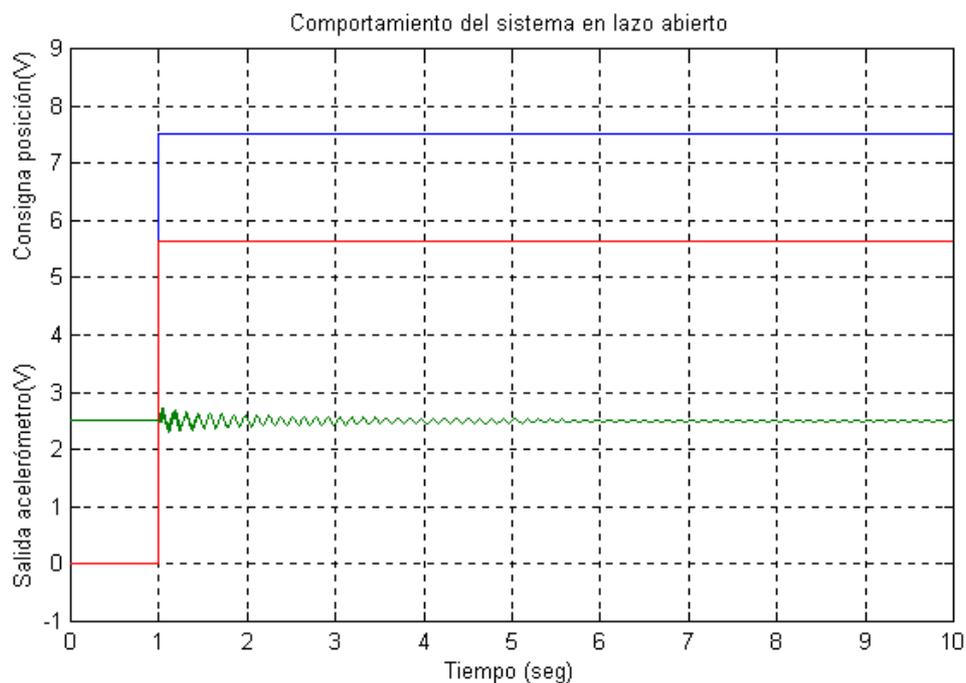
En cuanto al rango de trabajo de la tarjeta, ésta ha sido configurada a **± 10 V**.

Ha sido entonces a partir de los valores límite del rango de trabajo de ambos que se ha establecido la relación entre la posición del punto de la viga y la posición del cilindro. Esto significa que cuando desee que el punto de la viga esté en su posición máxima (máximo valor del rango de la tarjeta: +10 V) es necesario que el cilindro esté situado en su punto muerto superior (máximo valor del rango del sensor: +7.5 V). La relación es:

$$x = \frac{3}{4}$$

Una vez expuesta la relación entre ambas señales, nótese que el nivel de tensión de consigna escogido para la parte alta del escalón ha sido de **7.5 V**. Con este valor, se ordena que la posición de la viga sea tal que se corresponda con una posición del cilindro equivalente a **5.6250 V** (una vez que las vibraciones han desaparecido), o lo que es lo mismo, que el cilindro se sitúe 5.6250 cm por encima del punto medio del vástago.

En la Gráfica 7.1 se presenta la respuesta simulada del modelo a la consigna introducida.



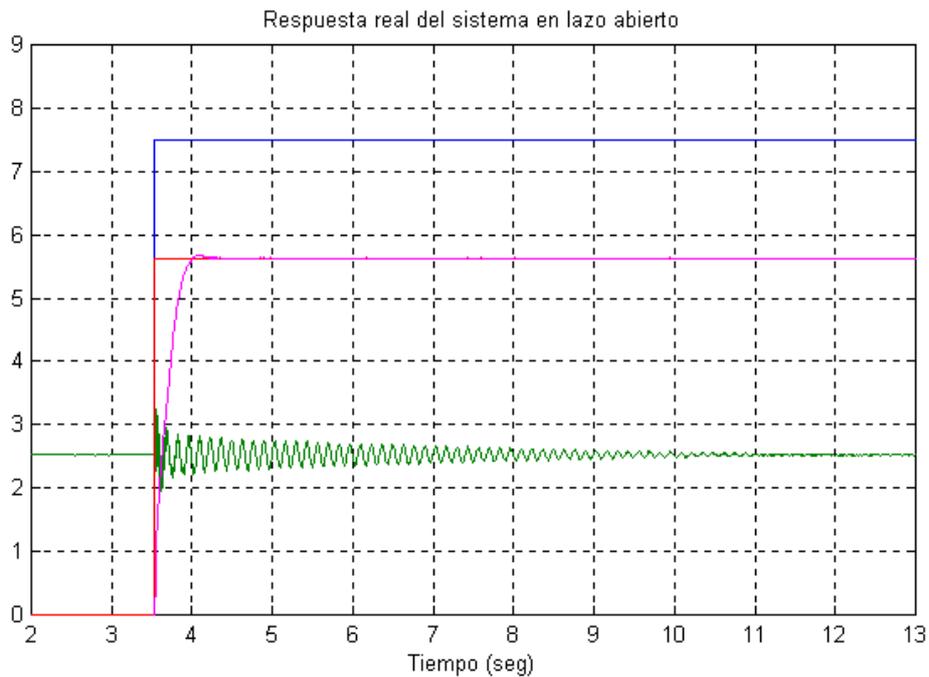
Gráfica 7.1 Respuesta simulada del modelo en lazo abierto

Azul	señal consigna viga (z)	(-1 ÷ +9 V)	(-0.75 ÷ +6.75 cm)
Rojo	señal consigna cilindro(z)	(-1 ÷ +9 V)	(-1 ÷ +9 cm)
Verde	señal aceleración extremo viga (z)	(-1 ÷ +9 V)	(-20 ÷ +180 g)

En azul puede verse la consigna de posición de la viga, mientras que en rojo se observa el valor de consigna introducido a la servoválvula. La aceleración a la que está sometido el punto considerado de la barra flexible, está representado en verde. Como puede observarse, el sistema responde con una serie de oscilaciones que tienden a estabilizarse pasados unos 6 segundos aproximadamente. Estas oscilaciones de la señal de salida se corresponderían con las vibraciones que aparecen en la barra flexible, una vez el actuador ha

llegado a la posición deseada. Una vez simulado el comportamiento del modelo en lazo abierto, se presenta la respuesta real del sistema en lazo abierto.

El programa de captura de datos se ha realizado bajo entorno LabVIEW. La presentación y descripción de éste se encuentra situado en el Anexo 6.1. La respuesta real del sistema en lazo abierto aparece en la Gráfica 7.2.



Gráfica 7.2 Respuesta real del sistema en lazo abierto

<i>Azul</i>	<i>señal consigna viga (z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +6.75 cm)</i>
<i>Rojo</i>	<i>señal consigna cilindro(z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +9 cm)</i>
<i>Verde</i>	<i>señal aceleración extremo viga (z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +180 g)</i>
<i>Magenta</i>	<i>posición cilindro (z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +9 cm)</i>

Al igual que antes, en azul puede verse la consigna de posición de la viga, mientras que en rojo se observa el valor de consigna introducido a la servoválvula. En cuanto a la salida del acelerómetro ésta se representa en verde. En cuanto a la posición del cilindro, señal obtenida del sensor de posición LVDT, ésta se representa en magenta.

Como puede verse en la gráfica, una vez la señal del LVDT se iguala a la señal de consigna de la servoválvula (apenas 0.5 segundos después de aplicar la consigna), el movimiento del cilindro es nulo. Esto quiere decir, que se ha llegado a la posición deseada.

En cambio, tal y como indica la señal del acelerómetro, la barra elástica aún continúa oscilando. Esto permite valorar las vibraciones que se producen en el sólido elástico. Remarcar que las vibraciones perceptibles en la barra cesan aproximadamente 7 segundos más tarde de haber llegado a la posición deseada.

Ahora ya es posible valorar cualitativamente el comportamiento del sistema con una determinada estrategia de control: cuanto antes desaparezcan esas vibraciones elásticas mejor.

7.5 Estudio de las estrategias de control

Una vez presentada la respuesta del sistema en lazo abierto, ya se puede pasar a describir las diferentes estrategias de control que se ensayaron en el sistema.

Para dicho propósito, en todos los casos, se presentarán los comportamientos del modelo simulado y del sistema real. Sin embargo, la presentación y descripción de los programas diseñados bajo entorno LabVIEW que implementan cada estrategia de control se encuentra en el Anexo 7.1.

7.5.1 Estrategia 1

La primera alternativa que se procedió a estudiar fue la siguiente (Figura 7.6):

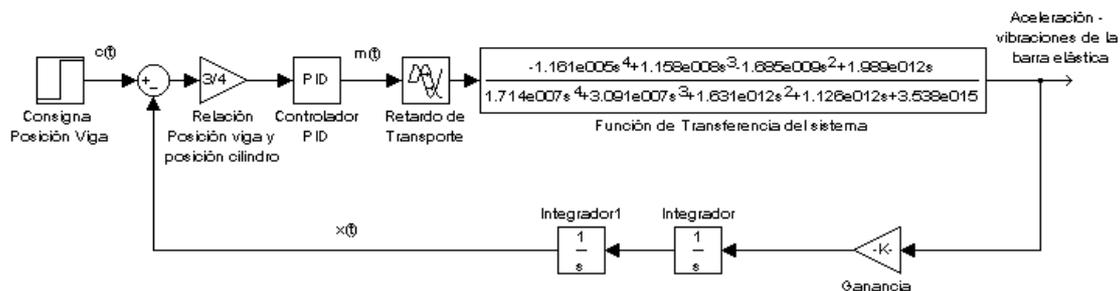


Figura 7.6 Estrategia de control 1

El objetivo que se pretendería conseguir con esta estrategia sería controlar la posición de la barra elástica a partir de integrar en dos ocasiones la salida del acelerómetro. Haciendo

esta operación matemática, conseguiríamos conocer, en teoría, cual es la posición real de la barra elástica.

Tal y como se observa en el esquema anterior, es necesario introducir una ganancia K en el lazo de realimentación. El objetivo de este bloque es ajustar los niveles de tensión existentes en el “sensor” a los niveles de tensión del sistema. Es decir, si tuviésemos, por ejemplo, un valor de $k=1$ el valor de la acción de control $m(t)$ (salida del controlador) sería muy superior al rango de tensión de nuestro controlador, que en este caso sería el rango de tensiones del canal de salida de la tarjeta de adquisición de datos.

En esta estrategia se utiliza, esencialmente, un lazo de realimentación con un PID. Para ajustar el controlador PID se utilizará el método empírico de sintonía en lazo cerrado de Ziegler y Nichols. Esta es una técnica clásica, que se puede encontrar en Ogata (1998).

Para realizar el ajuste hay que activar en el controlador PID sólo la acción proporcional, de forma que, partiendo de $K_p = 1$, se vaya aumentando este valor hasta conseguir que el sistema quede en oscilación mantenida. Una vez obtenido este estado, al valor de K_p que lo consigue se le denomina constante crítica K_{pc} . El otro parámetro que se debe medir es el periodo de esta oscilación mantenida, al que se le conoce como periodo crítico. A partir de estos datos, se aplican las fórmulas de Ziegler y Nichols.

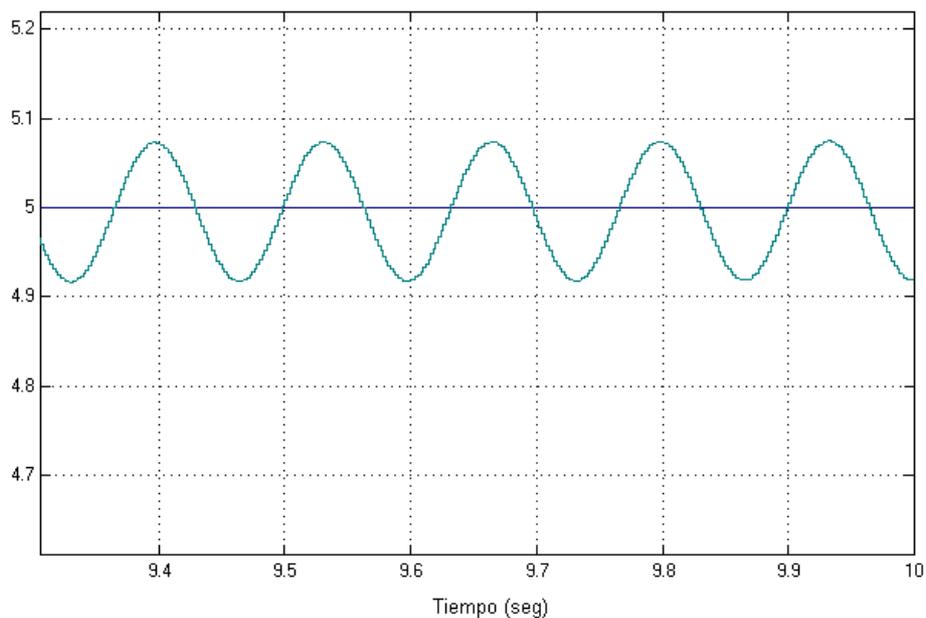
Los resultados de esta simulación se presentan en la Gráfica 7.3.

En la que los parámetros obtenidos son:

- **$K_{pc} = 0.46125$**
- **$T_c = 0.134 \text{ s}$**

El valor de la ganancia de realimentación, que produce esta oscilación, es:

$$k=4200$$



cyan

*Gráfica 7.3 Simulación estrategia 1
posición cilindro simulada(z)*

(4.7 ÷ +5.2 cm)

Entonces, la sintonía de los controladores es:

Parámetros	Regulador		
	P	PI	PID
Kp	0.23	0.21	0.28
Ti (s)		0.11	0.07
Td (s)			0.02
Kp	0.23	0.21	0.28
Ki		1.86	4.13
Kd			0

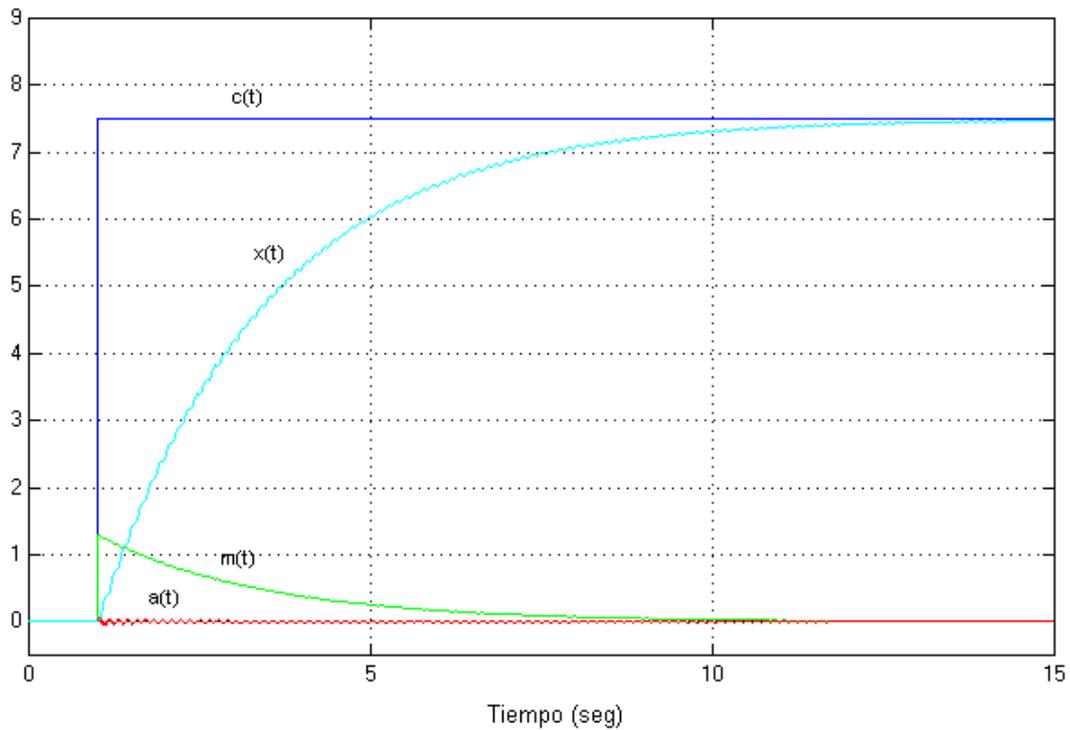
Tabla 7.1 Sintonía simulada de los controladores para la estrategia 1

Veamos cuál es el comportamiento del sistema una vez se introducen estos controladores.

Control P

Según se expuso anteriormente, el valor del controlador proporcional según Ziegler y Nichols es: **$K_p = 0.230625$** .

La respuesta del modelo simulado mediante Simulink aparece en la Gráfica 7.4.



Gráfica 7.4 Respuesta temporal con la estrategia 1, controlador P

Azul	señal consigna viga (z)	$(0 \div +9 V)$	$(0 \div +6.75 cm)$
Verde	señal acción de control (V)	$(0 \div +9 V)$	$(0 \div +9 V)$
Rojo	señal aceleración extremo viga (z)	$(0 \div +9 V)$	$(0 \div +180 g)$
Cyan	señal posición viga (z)	$(0 \div +9 V)$	$(0 \div +6.75 cm)$

En azul podemos ver la señal de consigna de posición de la viga. La señal en cian corresponde a la señal real de la posición de la viga obtenida a partir de integrar en dos ocasiones la aceleración del sistema. En cuanto a la señal que mide la aceleración de la barra flexible, ésta sería la señal roja. Por último, la señal acción de control $m(t)$ es la representada en color verde.

El hecho de que el error se anule es debido a que al añadir los dos integradores convertimos al sistema en un sistema de tipo 1.

Pero esto se trata de un caso ideal. La experiencia demostró que alguna vez parecía funcionar para perder la estabilidad en la prueba siguiente.

El principal inconveniente de esta estrategia es que resalta los defectos del acelerómetro. Los niveles de tensión que maneja este tipo de sensor son muy pequeños, cuando las aceleraciones son pequeñas. En consecuencia incorporan un alto nivel de ruido. Y posiblemente lo más perjudicial es que el nivel de offset de la tensión de salida es variable, pues incluye la componente normal (al acelerómetro) de la aceleración de la gravedad.

Todo ello hace que, aunque se ajuste perfectamente el valor de offset cuando la barra elástica está en condiciones iniciales de reposo, al aplicarle un escalón de forma que la barra cambie su posición, este valor de offset variará. Esto realmente tiene su importancia porque aunque el ajuste del offset sea bueno, el hecho de incorporar en el lazo de realimentación una ganancia de gran valor para amplificar la señal del acelerómetro, provoca que estas discrepancias se hagan mayores con lo que la posición que se obtiene a base de integrar en dos ocasiones la aceleración no se corresponde con la posición real.

Es por ello que, en un caso como este, no se debe utilizar ninguna estrategia de control basada en la incorporación de integradores puros, tales como ésta (Figura 7.7), por ejemplo.

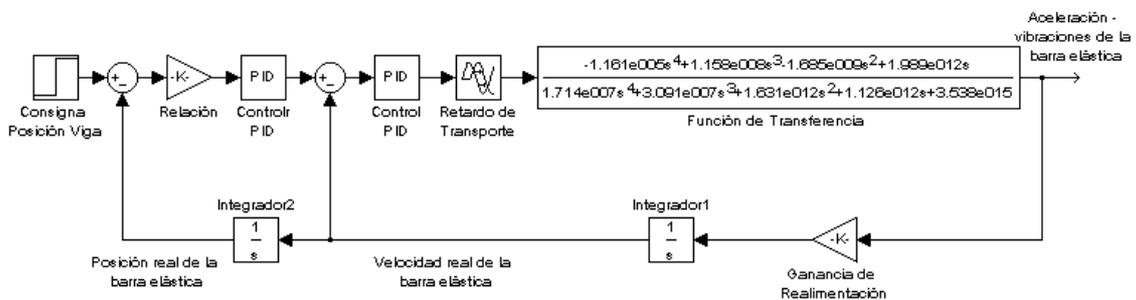


Figura 7.7 Estrategia de control 1 modificada

7.5.2 Estrategia 2

La alternativa que se describe a continuación está basada en el hecho de que la posición del punto de la viga que se desea posicionar, ya queda bien controlada debido a que la posición del cilindro esta regulada mediante un lazo de posición. Hay que destacar que la posición del punto de la viga se calcula a partir de la posición del cilindro suministrada por el sensor LVDT (asociado con el cilindro).

Este es el diagrama de bloques de la estrategia en estudio (Figura 7.8):

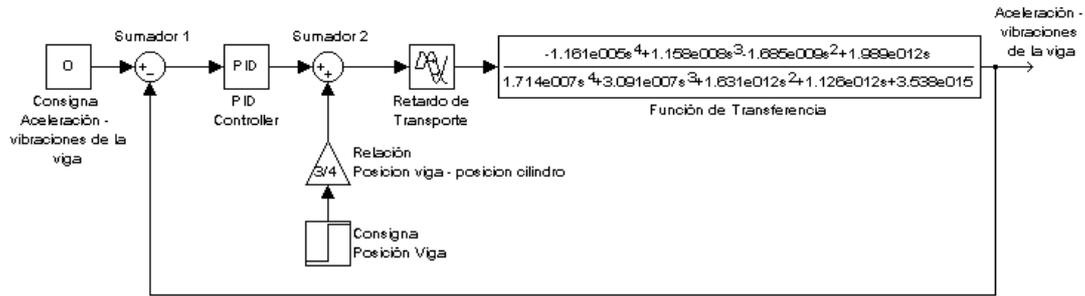


Figura 7.8 Estrategia de control 2

Pese a que la Figura 7.8 no es la manera normal de representar la estrategia de control tiene la virtud de explicar, muy claramente, cual es la filosofía subyacente. El objetivo que se pretende conseguir con esta estrategia es anular las vibraciones que se producen en la barra flexible debidas a su movimiento

Como puede verse, el objetivo es que las vibraciones de la barra sean nulas (Consigna aceleración de la viga = 0). Esta consigna es comparada con el valor real de la aceleración de la viga que es obtenido como salida del acelerómetro. *Esta señal, aceleración de la barra, es considerada como una perturbación del sistema*, mientras que la consigna ‘real’ del sistema es la consigna de posición de la viga.

En palabras sencillas, lo que se pretende es modificar la señal que se aplica a la servoválvula en función de las vibraciones a las que está sometida la viga con el objetivo de eliminar esas vibraciones.

Una vez se ha presentado la estrategia, quizá convendría exponer su representación más utilizada en el campo de la automática. Es la siguiente (Figura 7.9):

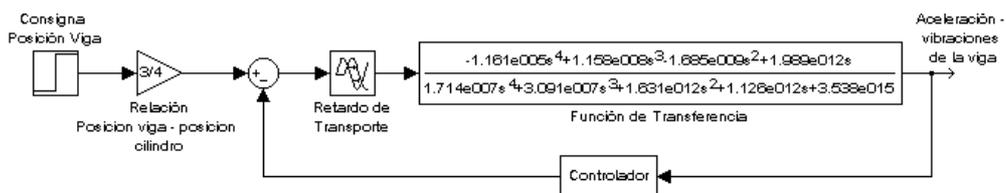


Figura 7.9 Estrategia de control 2

Se debe prestar especial atención al tipo de sumador utilizado para obtener la acción de control definitiva que se aplica a la servoválvula. Echando un vistazo a la estrategia inicial se puede observar que el signo – del sumador 1 se trasladaría al sumador 2 como tal. En caso de que este sumador fuera ++, el sistema sería inestable por el siguiente motivo. Al aplicar una consigna escalón a la servoválvula, ésta provoca el movimiento del cilindro, y a su vez, el de la barra elástica. Por tanto, en ella se produce un movimiento con una cierta aceleración. Como el objetivo es precisamente eliminar esta aceleración, lo que debemos hacer es frenar el movimiento de la viga, o lo que es lo mismo, frenar el movimiento del cilindro. Por tanto, la señal que apliquemos a la servoválvula debería ser menor. Esto lo conseguiremos con este tipo de sumador (+ -).

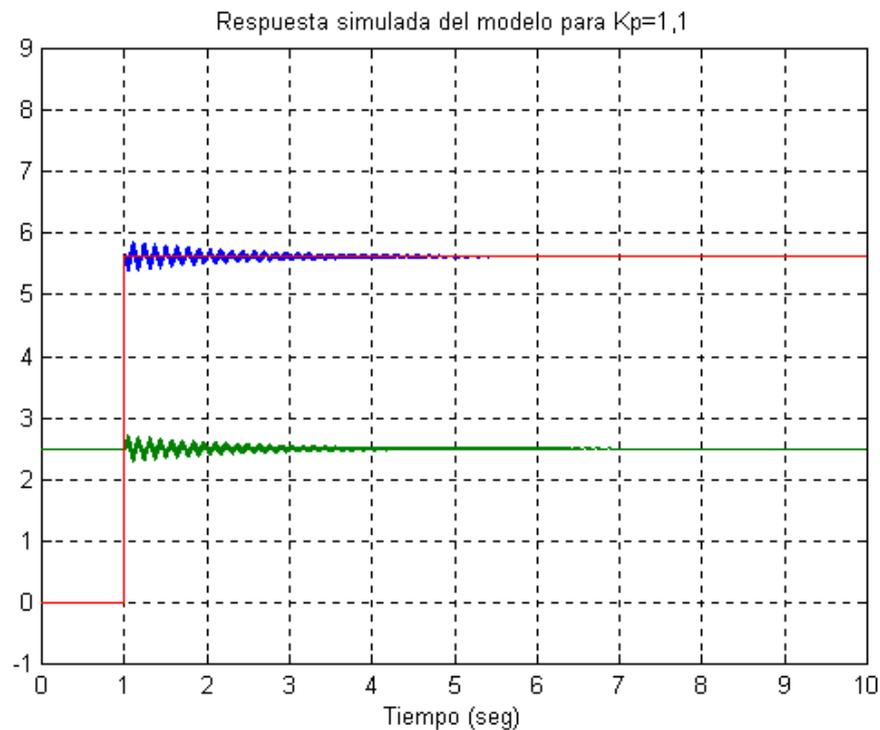
El tipo de controlador ha de ser exclusivamente proporcional debido a las características del acelerómetro: alto nivel de ruido en aceleraciones bajas y un nivel de offset variable. La primera descarta un control derivativo y la segunda uno integral.

La sintonización de este controlador se realiza en función de su forma de actuar, o lo que es lo mismo, a base de la experimentación prueba-error. El proceso para su ajuste será el siguiente. Se debe aplicar una señal de consigna de posición a la servoválvula de forma que refleje la posición a la que ha de llegar la barra flexible. Se dará un valor predeterminado a la constante proporcional del controlador y se observará la respuesta del sistema. Se irá repitiendo esta prueba modificando la constante proporcional hasta el momento en que la respuesta del sistema sea satisfactoria. En este caso, tendremos una respuesta satisfactoria cuando las vibraciones de la viga se atenúen al máximo y el posicionamiento en el punto deseado se realice en el menor tiempo posible.

7.5.2.1 Sintonización del controlador mediante simulación

Lo primero que se debe hacer es establecer una determinada constante de proporcionalidad e ir aumentándola hasta observar un comportamiento inestable del sistema. Esto es así ya que cuanto mayor sea el valor de dicha constante, mayor rapidez tendrá el lazo de regulación. El inconveniente es que si se establece un valor demasiado elevado, el comportamiento del sistema podría convertirse en inestable.

A continuación se observa la respuesta del sistema simulado, para un valor de K_p tal que no inestabiliza el sistema y su respuesta es lo más rápida posible.



Gráfica 7.5 Respuesta simulada estrategia 2

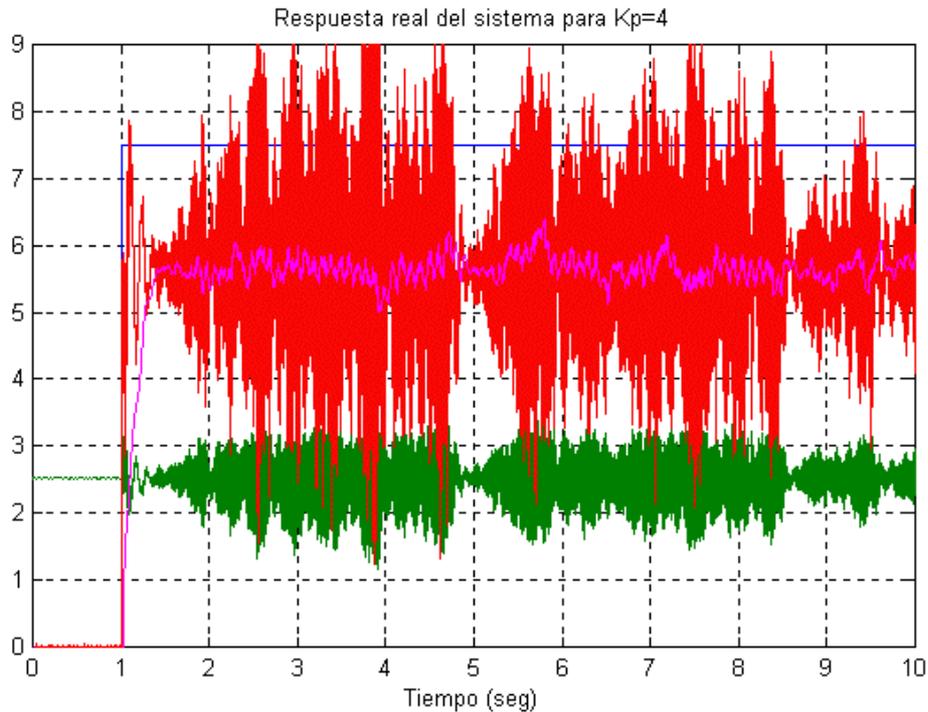
<i>Azul</i>	<i>señal consigna viga (z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +6.75 cm)</i>
<i>Rojo</i>	<i>señal consigna cilindro(z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +9 cm)</i>
<i>Verde</i>	<i>señal aceleración extremo viga (z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +180 g)</i>
<i>Magenta</i>	<i>señal posición cilindro (z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +9 cm)</i>

En rojo puede verse la consigna de posición del cilindro, mientras que en azul se observa el valor de la acción de control que finalmente se introduce a la servoválvula. En cuanto a la salida del sistema, la aceleración (vibraciones a las que está sometida la barra flexible), se representa en verde. Como puede observarse, el sistema es capaz de anular las vibraciones en unos 2 segundos.

7.5.2.2 Sintonización del controlador experimentalmente

Se ha procedido de la misma forma que en la simulación. Se ha establecido una determinada constante de proporcionalidad y se ha aumentado hasta observar un comportamiento inestable del sistema.

Se observó el siguiente comportamiento para $K_p = 4$.



Gráfica 7.6 Respuesta real con estrategia 2, $K_p=4$

<i>Azul</i>	<i>señal consigna viga (z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +6.75 cm)</i>
<i>Rojo</i>	<i>señal consigna cilindro(z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +9 cm)</i>
<i>Verde</i>	<i>señal aceleración extremo viga (z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +180 g)</i>
<i>Magenta</i>	<i>señal posición cilindro (z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +9 cm)</i>

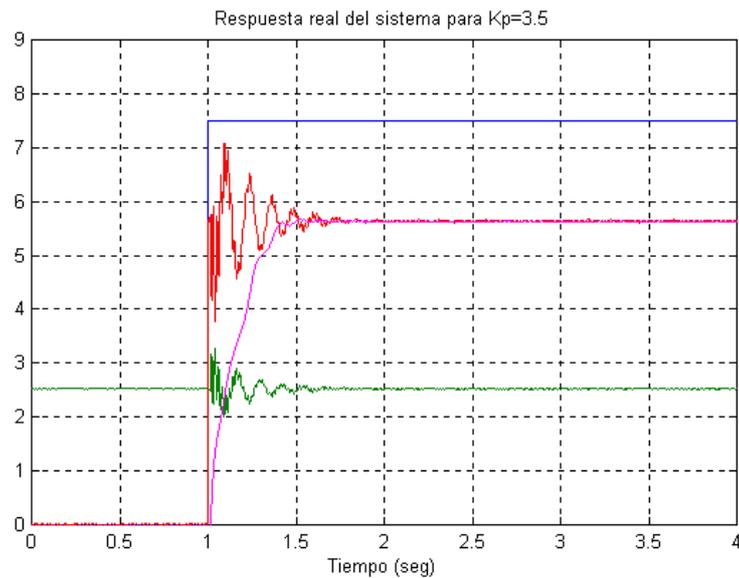
En azul puede verse la consigna de posición de la viga, mientras que en rojo se observa el valor de consigna introducido a la servoválvula. En cuanto a la salida del acelerómetro ésta se representa en verde. En cuanto a la posición del cilindro, señal obtenida del sensor de posición LVDT, ésta se representa en magenta.

Como puede verse el comportamiento es inestable lo que indica que el valor de K_p es demasiado grande.

Para mostrar la trascendencia del valor de K_p en la respuesta del sistema, a continuación se presenta como se comporta el sistema para varios valores de ésta teniendo en cuenta que en los tres casos la respuesta es estable.

En todas ellas, en azul puede verse la consigna de posición de la viga, mientras que en rojo se observa el valor de consigna introducido a la servoválvula. En verde se representa la salida del acelerómetro y en magenta la posición del cilindro.

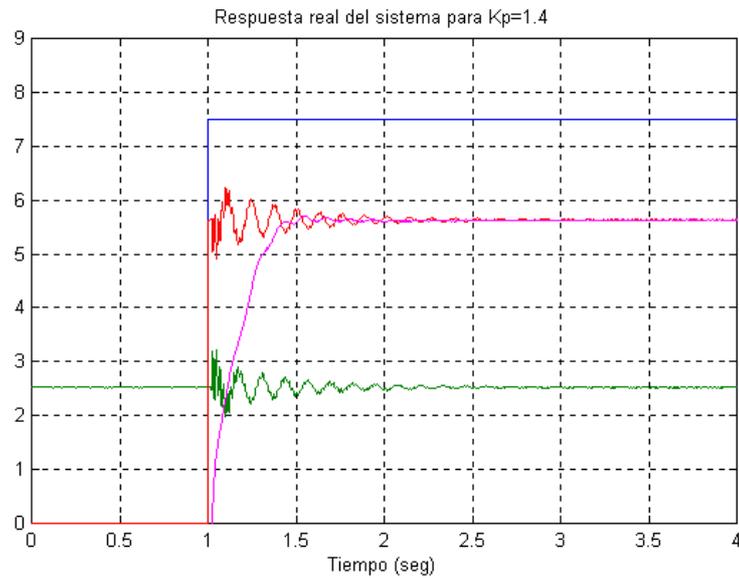
Para $K_p = 3.5$ la respuesta del sistema fue ésta:



Gráfica 7.7 Respuesta real con estrategia 2, $K_p=3.5$

<i>Azul</i>	<i>señal consigna viga (z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +6.75 cm)</i>
<i>Rojo</i>	<i>señal consigna cilindro(z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +9 cm)</i>
<i>Verde</i>	<i>señal aceleración extremo viga (z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +180 g)</i>
<i>Magenta</i>	<i>señal posición cilindro (z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +9 cm)</i>

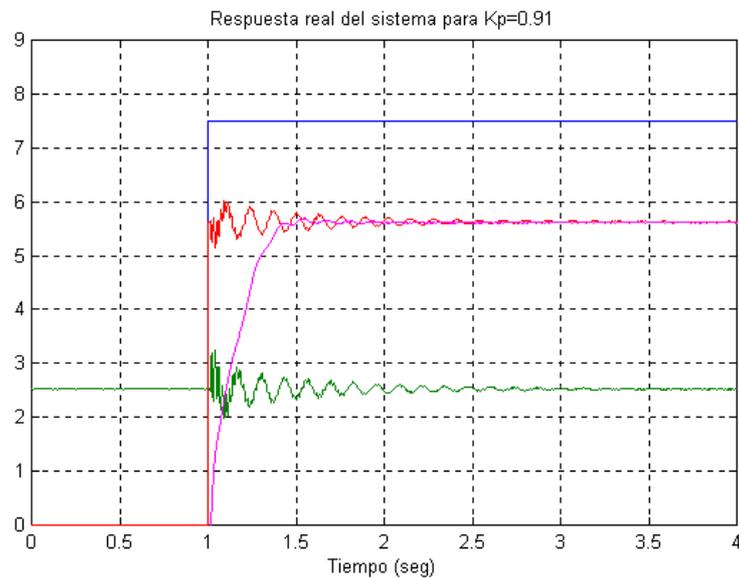
Para $K_p = 1.4$ la respuesta del sistema fue ésta:



Gráfica 7.8 Respuesta real con estrategia 2, $K_p=1.4$

<i>Azul</i>	<i>señal consigna viga (z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +6.75 cm)</i>
<i>Rojo</i>	<i>señal consigna cilindro(z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +9 cm)</i>
<i>Verde</i>	<i>señal aceleración extremo viga (z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +180 g)</i>
<i>Magenta</i>	<i>señal posición cilindro (z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +9 cm)</i>

Para $K_p = 0.9$ la respuesta del sistema fue ésta:



Gráfica 7.9 Respuesta real con estrategia 2, $K_p=0.9$

<i>Azul</i>	<i>señal consigna viga (z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +6.75 cm)</i>
<i>Rojo</i>	<i>señal consigna cilindro(z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +9 cm)</i>
<i>Verde</i>	<i>señal aceleración extremo viga (z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +180 g)</i>
<i>Magenta</i>	<i>señal posición cilindro (z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +9 cm)</i>

Como puede verse, a medida que disminuye el valor de la constante proporcional el sistema se comporta de la siguiente manera:

- aumenta en pequeña proporción el tiempo que necesita el cilindro para llegar a la posición correspondiente a la posición deseada de la viga. En las gráficas anteriores esto sucede entorno al $T=1.5$ s, es decir, medio segundo más tarde de aplicar la señal de consigna de posición.
- aumenta claramente la duración de las vibraciones de la viga una vez el cilindro permanece en posición de reposo (ha llegado a la posición de reposo). En las gráficas anteriores se deduce que la aceleración de la viga (vibración) se elimina cada vez más tarde.

Como puede observarse, el comportamiento con respecto a la respuesta del sistema en lazo abierto ha mejorado enormemente. Mientras que en lazo abierto las vibraciones en la estructura cesan aproximadamente 7 segundos más tarde de que el cilindro llegue a la posición deseada, con esta estructura (para un valor de $K_p = 3.5$) las vibraciones cesan en apenas 0.25 segundos.

Pese a este gran resultado, esta estrategia tiene un inconveniente a priori. Este hecho radica en que se intenta eliminar las vibraciones de la viga nada más se aplica la señal de consigna de posición. De esta forma estamos también intentando eliminar la aceleración con la que se debería mover la viga para llegar a esa posición. Es por ello que se propone la siguiente mejora de la estrategia anterior.

7.5.3 Estrategia 3

Esta estrategia es una mejora de la estrategia anterior en la que se activa el lazo de control en aceleraciones cuando el servoactuador está llegando a la posición establecida. De esta manera no se frena la aceleración inicial del actuador.

Para ajustar esta estrategia se procede de la misma forma que la anterior, es decir, por método prueba-error.

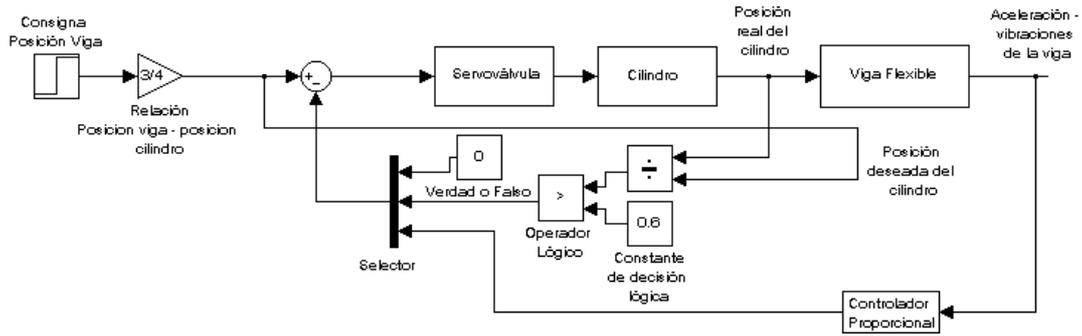


Figura 7.10 Estrategia de control 3

Lo que se plantea es comparar la posición real del cilindro con la posición deseada. Mientras la posición real no ha llegado a un tanto por ciento determinado de la posición deseada, el lazo de control proporcional de aceleraciones no actuará. Una vez la posición de éste haya sobrepasado ese valor umbral, el control proporcional actuará modificando la señal que le llega a la servoválvula a través de su servoamplificador.

Por ejemplo, supongamos que seleccionamos un valor de la Constante de decisión lógica de 0.6. Esto quiere decir que mientras la posición del cilindro no sobrepase el 60 % de la posición deseada, la señal que se resta en el sumador es 0. Es decir, no actúa la realimentación. Una vez la posición del cilindro sobrepase ese 60 % de la posición deseada, se activa el lazo de control de aceleraciones. Será entonces cuando el control intentará eliminar las vibraciones de la barra elástica modificando la posición del servoactuador.

Para hacer el ajuste de esta estrategia trabajaremos con los tres valores de K_p utilizados en la alternativa anterior. El ajuste final se determinará modificando el valor de la constante de decisión.

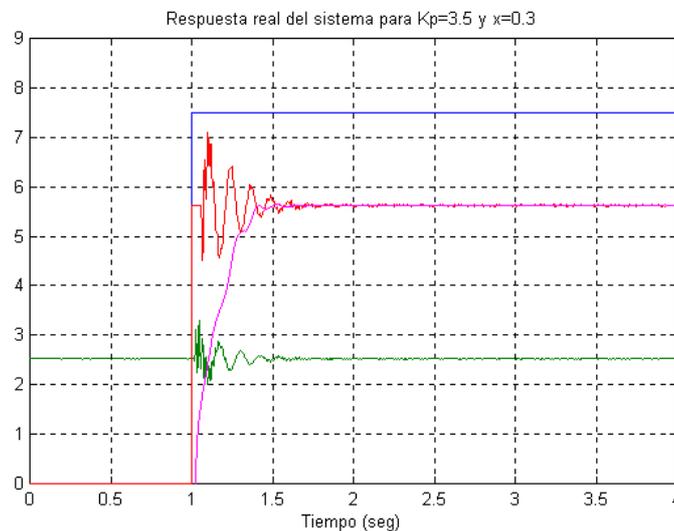
Cabe destacar que cuanto más próximo sea este valor a 1, mas tarde se intenta atenuar la aceleración del movimiento vibratorio de la viga elástica. Cuanto más próximo sea este valor a 0, más se acerca la estrategia actual a la estrategia anterior. El inconveniente que podría surgir es que para un valor de la constante lógica de decisión muy próximo a 1, el comportamiento del sistema se vuelva inestable.

A continuación se presentan las respuestas del sistema para los tres valores de K_p estudiados anteriormente y se hace un barrido de unos determinados valores de interés de la constante de decisión lógica (entre 0 y 1). A partir de ahora, la constante de decisión lógica será x .

En todas ellas se ha utilizado los mismos colores que en gráficas anteriores.

A continuación (Gráficas 7.10 a 7.14) se presentan los resultados obtenidos para $K_p = 3.5$.

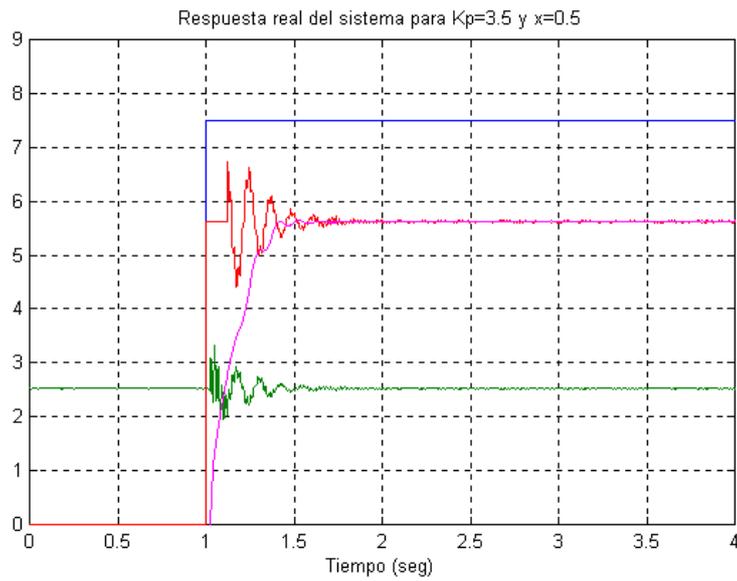
- $x = 0.3$



Gráfica 7.10 Estrategia de control 3 $K_p=3.5$ $x=0.3$

<i>Azul</i>	<i>señal consigna viga (z)</i>	$(0 \div +9 V)$	$(0 \div +6.75 cm)$
<i>Rojo</i>	<i>señal consigna cilindro(z)</i>	$(0 \div +9 V)$	$(0 \div +9 cm)$
<i>Verde</i>	<i>señal aceleración extremo viga (z)</i>	$(0 \div +9 V)$	$(0 \div +180 g)$
<i>Magenta</i>	<i>posición cilindro (z)</i>	$(0 \div +9 V)$	$(0 \div +9 cm)$

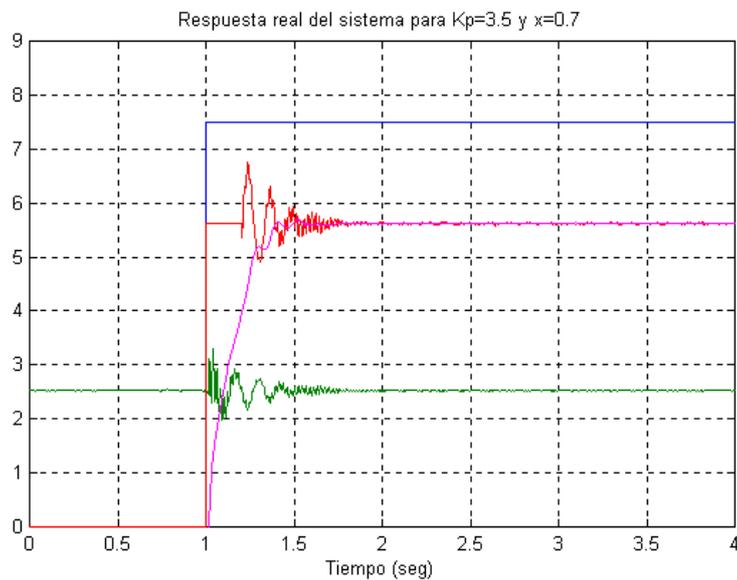
- $x = 0.5$



Gráfica 7.11 Estrategia de control 3 $K_p=3.5$ $x=0.5$

<i>Azul</i>	<i>señal consigna viga (z)</i>	$(0 \div +9 V)$	$(0 \div +6.75 cm)$
<i>Rojo</i>	<i>señal consigna cilindro(z)</i>	$(0 \div +9 V)$	$(0 \div +9 cm)$
<i>Verde</i>	<i>señal aceleración extremo viga (z)</i>	$(0 \div +9 V)$	$(0 \div +180 g)$
<i>Magenta</i>	<i>posición cilindro (z)</i>	$(0 \div +9 V)$	$(0 \div +9 cm)$

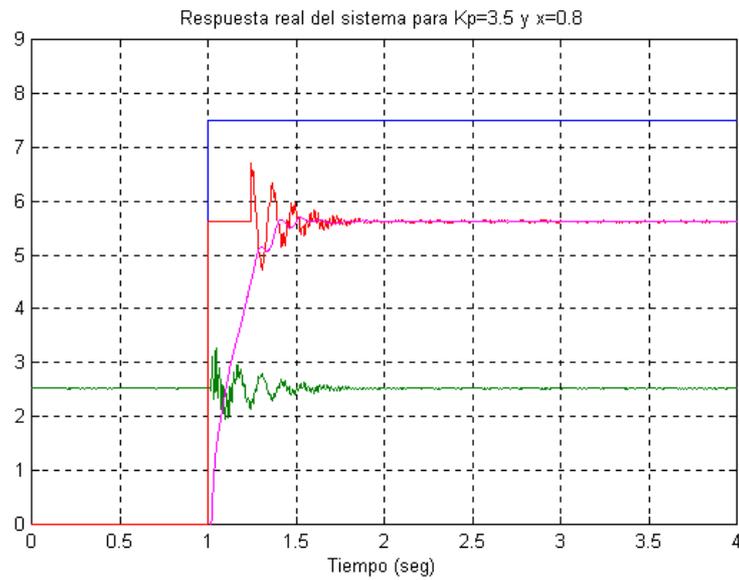
- $x = 0.7$



Gráfica 7.12 Estrategia de control 3 $K_p=3.5$ $x=0.7$

<i>Azul</i>	<i>señal consigna viga (z)</i>	$(0 \div +9 V)$	$(0 \div +6.75 cm)$
<i>Rojo</i>	<i>señal consigna cilindro(z)</i>	$(0 \div +9 V)$	$(0 \div +9 cm)$
<i>Verde</i>	<i>señal aceleración extremo viga (z)</i>	$(0 \div +9 V)$	$(0 \div +180 g)$
<i>Magenta</i>	<i>posición cilindro (z)</i>	$(0 \div +9 V)$	$(0 \div +9 cm)$

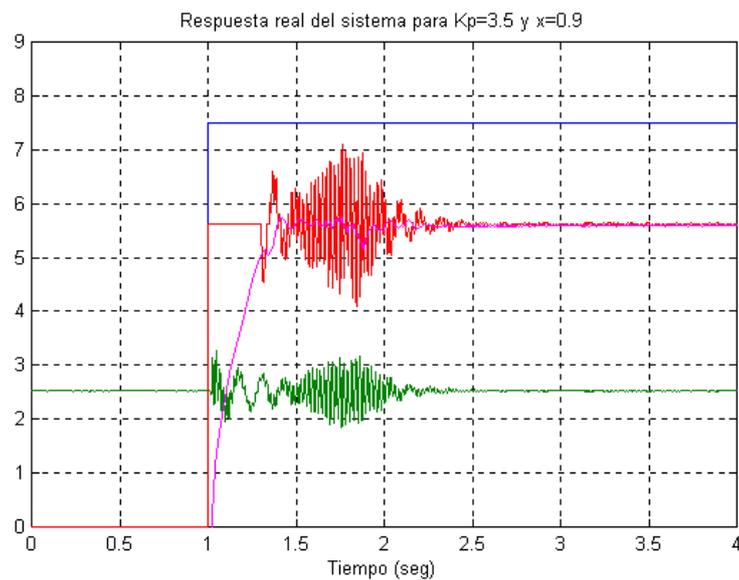
- $x = 0.8$



Gráfica 7.13 Estrategia de control 3 $K_p=3.5$ $x=0.8$

Azul	señal consigna viga (z)	(0 ÷ +9 V)	(0 ÷ +6.75 cm)
Rojo	señal consigna cilindro(z)	(0 ÷ +9 V)	(0 ÷ +9 cm)
Verde	señal aceleración extremo viga (z)	(0 ÷ +9 V)	(0 ÷ +180 g)
Magenta	posición cilindro (z)	(0 ÷ +9 V)	(0 ÷ +9 cm)

- $x = 0.9$



Gráfica 7.14 Estrategia de control 3 $K_p=3.5$ $x=0.9$

Azul	señal consigna viga (z)	(0 ÷ +9 V)	(0 ÷ +6.75 cm)
Rojo	señal consigna cilindro(z)	(0 ÷ +9 V)	(0 ÷ +9 cm)
Verde	señal aceleración extremo viga (z)	(0 ÷ +9 V)	(0 ÷ +180 g)
Magenta	posición cilindro (z)	(0 ÷ +9 V)	(0 ÷ +9 cm)

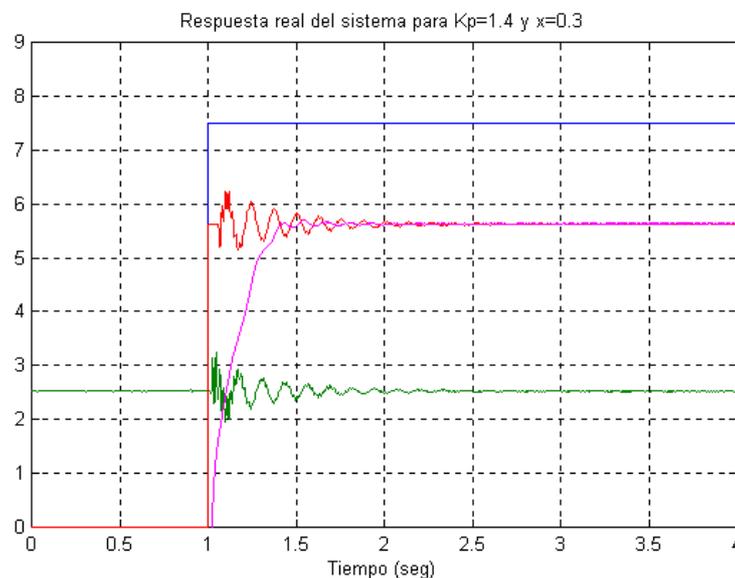
Como puede verse para $K=3.5$, a medida que aumenta el valor de la constante de decisión lógica x , aumentan también las vibraciones que sufre la barra elástica una vez ha llegado el cilindro a la posición deseada.

Cabe destacar la curiosidad de los resultados que hacen referencia al tiempo que necesita el cilindro para situarse en la posición deseada. En todos los casos, ese tiempo parece ser idéntico para cualquier valor de x .

Se observa también el hecho de que en caso de no actuar a tiempo sobre la aceleración de la viga (en el caso de $x = 0.9$), el comportamiento del sistema es inestable ya que la estrategia de control provoca la aparición de vibraciones anormales.

A continuación (Gráficas 7.15 a 7.20) se presentan los resultados obtenidos para $K_p = 1.4$.

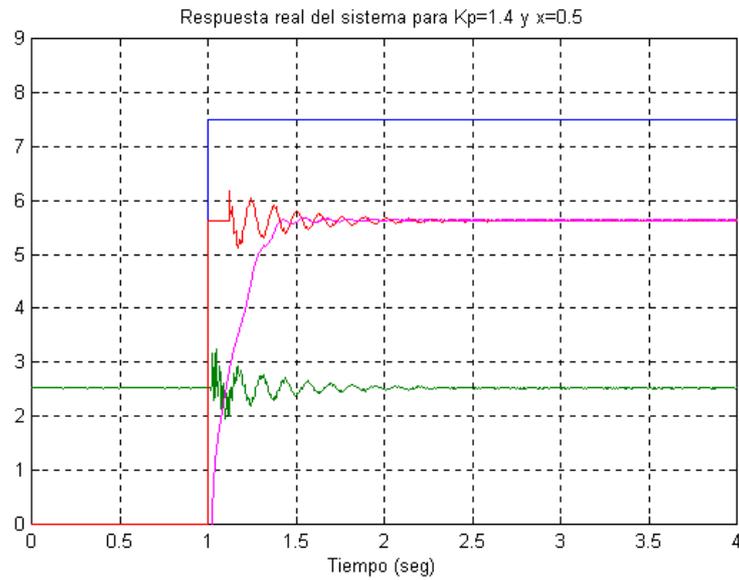
- $x = 0.3$



Gráfica 7.15 Estrategia de control 3 $K_p=1.4$ $x=0.3$

Azul	señal consigna viga (z)	(0 ÷ +9 V)	(0 ÷ +6.75 cm)
Rojo	señal consigna cilindro(z)	(0 ÷ +9 V)	(0 ÷ +9 cm)
Verde	señal aceleración extremo viga (z)	(0 ÷ +9 V)	(0 ÷ +180 g)
Magenta	posición cilindro (z)	(0 ÷ +9 V)	(0 ÷ +9 cm)

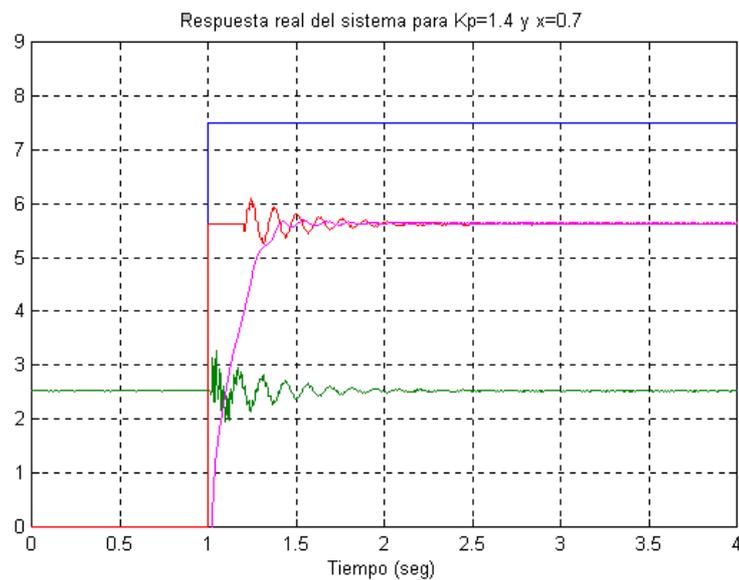
- $x = 0.5$



Gráfica 7.16 Estrategia de control 3 $K_p=1.4$ $x=0.5$

<i>Azul</i>	<i>señal consigna viga (z)</i>	$(0 \div +9 V)$	$(0 \div +6.75 cm)$
<i>Rojo</i>	<i>señal consigna cilindro(z)</i>	$(0 \div +9 V)$	$(0 \div +9 cm)$
<i>Verde</i>	<i>señal aceleración extremo viga (z)</i>	$(0 \div +9 V)$	$(0 \div +180 g)$
<i>Magenta</i>	<i>posición cilindro (z)</i>	$(0 \div +9 V)$	$(0 \div +9 cm)$

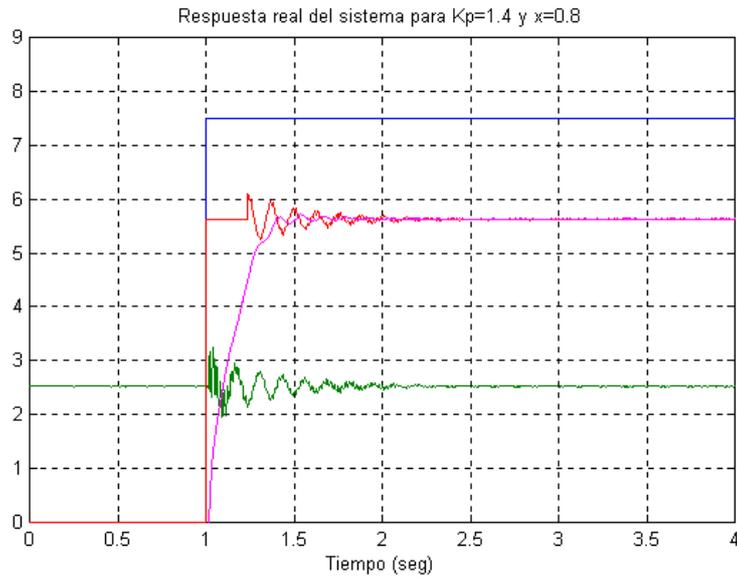
- $x = 0.7$



Gráfica 7.17 Estrategia de control 3 $K_p=1.4$ $x=0.7$

<i>Azul</i>	<i>señal consigna viga (z)</i>	$(0 \div +9 V)$	$(0 \div +6.75 cm)$
<i>Rojo</i>	<i>señal consigna cilindro(z)</i>	$(0 \div +9 V)$	$(0 \div +9 cm)$
<i>Verde</i>	<i>señal aceleración extremo viga (z)</i>	$(0 \div +9 V)$	$(0 \div +180 g)$
<i>Magenta</i>	<i>posición cilindro (z)</i>	$(0 \div +9 V)$	$(0 \div +9 cm)$

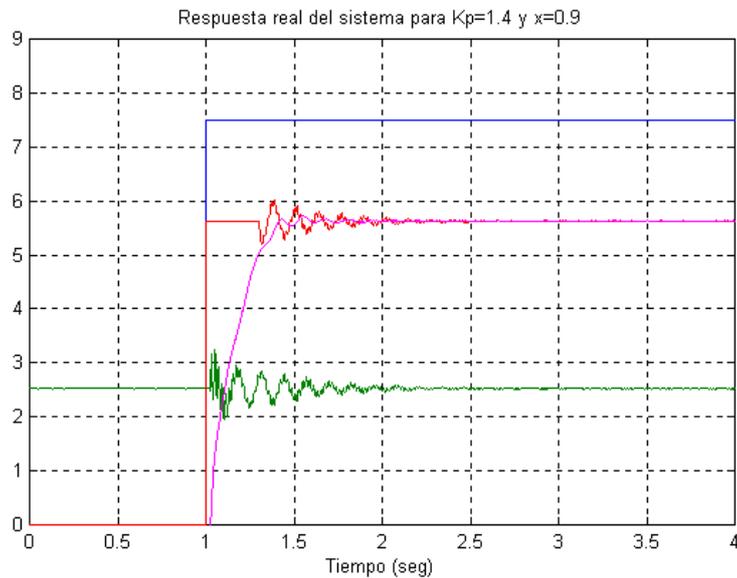
- $x = 0.8$



Gráfica 7.18 Estrategia de control 3 $K_p=1.4$ $x=0.8$

<i>Azul</i>	<i>señal consigna viga (z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +6.75 cm)</i>
<i>Rojo</i>	<i>señal consigna cilindro(z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +9 cm)</i>
<i>Verde</i>	<i>señal aceleración extremo viga (z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +180 g)</i>
<i>Magenta</i>	<i>posición cilindro (z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +9 cm)</i>

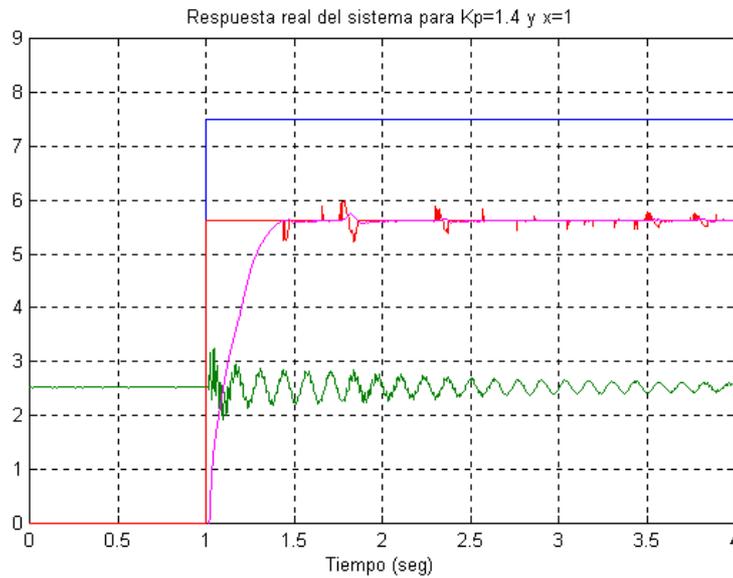
- $x = 0.9$



Gráfica 7.19 Estrategia de control 3 $K_p=1.4$ $x=0.9$

<i>Azul</i>	<i>señal consigna viga (z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +6.75 cm)</i>
<i>Rojo</i>	<i>señal consigna cilindro(z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +9 cm)</i>
<i>Verde</i>	<i>señal aceleración extremo viga (z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +180 g)</i>
<i>Magenta</i>	<i>posición cilindro (z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +9 cm)</i>

- $x = 1$



Gráfica 7.20 Estrategia de control 3 $K_p=1.4$ $x=1$

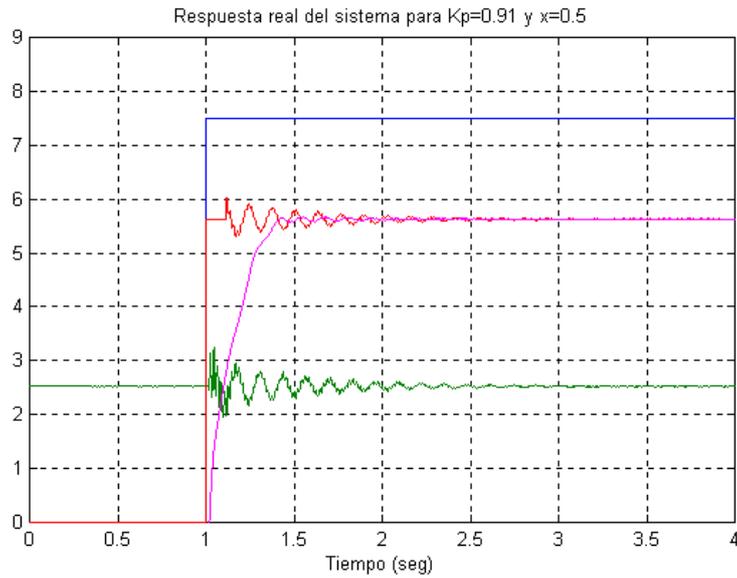
<i>Azul</i>	<i>señal consigna viga (z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +6.75 cm)</i>
<i>Rojo</i>	<i>señal consigna cilindro(z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +9 cm)</i>
<i>Verde</i>	<i>señal aceleración extremo viga (z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +180 g)</i>
<i>Magenta</i>	<i>posición cilindro (z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +9 cm)</i>

Como puede verse para $K=1.4$, a medida que aumenta el valor de la constante de decisión lógica x , aumentan también las vibraciones que sufre la barra elástica una vez ha llegado el cilindro a la posición deseada, pero en este caso en menor medida que para $K=3.5$.

Se observa también el hecho de que en caso de no actuar sobre la aceleración de la viga (en el caso de $x = 1$), el comportamiento del sistema pasa a ser prácticamente igual que el de lazo abierto.

A continuación (Gráficas 7.21 a 7.23) se presentan los resultados obtenidos para $K_p = 0.91$.

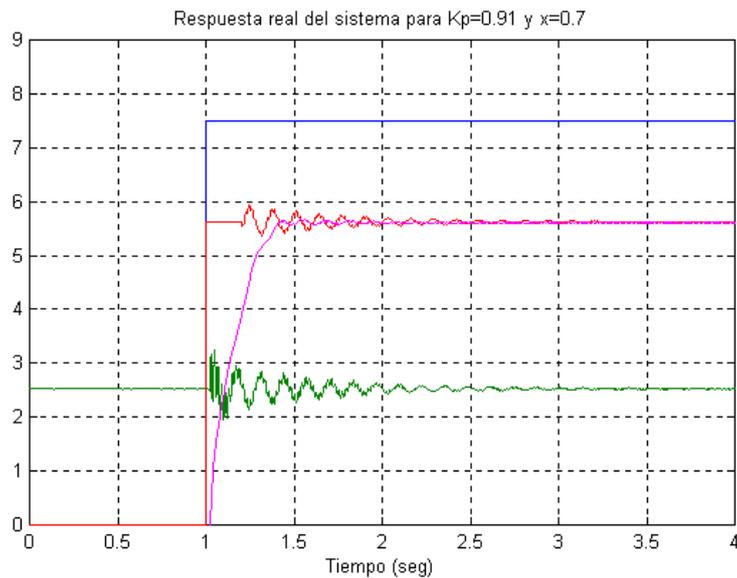
- $x = 0.5$



Gráfica 7.21 Estrategia de control 3 $K_p=0.91$ $x=0.5$

<i>Azul</i>	<i>señal consigna viga (z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +6.75 cm)</i>
<i>Rojo</i>	<i>señal consigna cilindro(z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +9 cm)</i>
<i>Verde</i>	<i>señal aceleración extremo viga (z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +180 g)</i>
<i>Magenta</i>	<i>posición cilindro (z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +9 cm)</i>

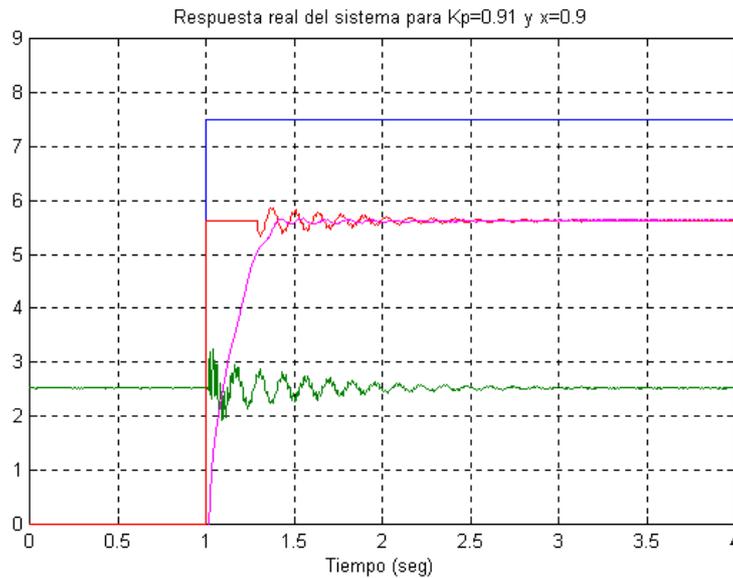
- $x = 0.7$



Gráfica 7.22 Estrategia de control 3 $K_p=0.91$ $x=0.7$

<i>Azul</i>	<i>señal consigna viga (z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +6.75 cm)</i>
<i>Rojo</i>	<i>señal consigna cilindro(z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +9 cm)</i>
<i>Verde</i>	<i>señal aceleración extremo viga (z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +180 g)</i>
<i>Magenta</i>	<i>posición cilindro (z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +9 cm)</i>

- $\alpha = 0.9$



Gráfica 7.23 Estrategia de control 3 $K_p=0.91$ $\alpha=0.9$

<i>Azul</i>	<i>señal consigna viga (z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +6.75 cm)</i>
<i>Rojo</i>	<i>señal consigna cilindro(z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +9 cm)</i>
<i>Verde</i>	<i>señal aceleración extremo viga (z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +180 g)</i>
<i>Magenta</i>	<i>posición cilindro (z)</i>	<i>(0 ÷ +9 V)</i>	<i>(0 ÷ +9 cm)</i>

7.6 Determinación de los parámetros de evaluación

Con el objetivo de evaluar el comportamiento de las estrategias de control estudiadas, se han determinado una serie de parámetros que reflejan el comportamiento del sistema.

Estos parámetros se dan en términos de un índice de desempeño: IAE, ISE, ITAE, IAU, IADU.

A continuación se explica el programa en Matlab .m que ha permitido obtener esos parámetros. Hay que destacar que como el objetivo es atenuar, reducir o eliminar las vibraciones que aparecen en la barra elástica se tomará como señal de error $e(t)$ la señal de salida del acelerómetro una vez el cilindro ya ha llegado a la posición deseada. Esto sucede, aproximadamente, 0.5 segundos después de aplicar la señal escalón de consigna de posición.

El programa es el siguiente:

```

% Parametros.m

load prueba.mat;           % Cargo el fichero que almacena la variable con los datos
                             % exportados de Excel.

Ts=0.002;                 % Defino el periodo de muestreo
T1=1;                     % Defino el instante en el que se produce el escalón de consigna
T2=0.5;                   % Defino aproximadamente el tiempo que tarda el cilindro a llegar
                             % a la posición deseada.
T3=T1+T2;                 % Calculo el tiempo absoluto de T2.
Tf=10;                   % Defino el instante en el que a partir del cual ya no tengo en
                             % cuenta más datos. Corresponde al límite superior de la integral
                             % definida.

n=(Tf/Ts)-(T1/Ts);        % Defino el número de muestras existentes en ese periodo de
                             % tiempo

% Selecciono y asigno a variables las columnas del fichero .mat
t=prueba(:,1);
uviga=prueba(:,2);
yaceleracion=prueba(:,3);
ucilindro=prueba(:,4);
ycilindro=prueba(:,5);

% Hago la traspuesta de las variables anteriores
t=transpose(t);
uviga=transpose(uviga);
yaceleracion=transpose(yaceleracion);
ucilindro=transpose(ucilindro);
ycilindro=transpose(ycilindro);

% Selecciono los datos a partir de que se aplica la excitación al sistema consigna (escalón).
t=t(1,T1/Ts:Tf/Ts);
uviga=uviga(1,T1/Ts:Tf/Ts);
yaceleracion=yaceleracion(1,T1/Ts:Tf/Ts);
ucilindro=ucilindro(1,T1/Ts:Tf/Ts);
ycilindro=ycilindro(1,T1/Ts:Tf/Ts);

% Creo una variable para la acción de control
MV=ucilindro;

```

% Determino la señal de error que voy a estudiar. En este caso será la vibración que sufre la barra elástica una vez el cilindro ha llegado a la posición deseada.

```
valor_medio_acelerometro=2.5275;  
error=yaceleracion-valor_medio_acelerometro;  
vibracion=error(1,T2/Ts:n);
```

% Calculo el valor absoluto del error que voy a estudiar: la vibración.

```
iae=abs(vibracion);
```

% Calculo el valor cuadrado del error que voy a estudiar: la vibración.

```
ise=vibracion.*vibracion;
```

% Calculo el valor ponderado del error que voy a estudiar: la vibración.

```
tiempo=t(1,T2/Ts:n);  
tiempo=tiempo-T2;  
abs_er=iae;  
itae=tiempo.*abs_er;
```

% Calculo el valor absoluto de la acción de control.

```
iau=abs(MV);
```

% Calculo el valor absoluto de la derivada de la acción de control.

```
dMV(1)=MV(1)/Ts;  
for i=2:n,  
    dMV(i)=(MV(i)-MV(i-1))/Ts;  
end;  
iadu=abs(dMV);
```

% Calculo los parámetros de interés.

% Calculo el parámetro IAE

```
sumIAE=iae(1);  
for i=1:(n-(T2/Ts)),  
    sumIAE=sumIAE+iae(i);  
end;  
Valor_de_IAE=sumIAE*Ts
```

% Calculo el parámetro ISE

```
sumISE=ise(1);  
for i=1:(n-(T2/Ts)),  
    sumISE=sumISE+ise(i);  
end;  
Valor_de_ISE=sumISE*Ts
```

```

% Cálculo el parámetro ITAE
sumITAE=itae(1);
for i=2:(n-(T2/Ts)),
    sumITAE=sumITAE+itae(i);
end;
Valor_de_ITAE=sumITAE*Ts

```

```

% Cálculo el parámetro IAU
sumIAU=iau(1);
for i=1:n,
    sumIAU=sumIAU+iau(i);
end;
Valor_de_IAU=sumIAU*Ts

```

```

% Cálculo el parámetro IADU
sumIADU=iadu(1);
for i=1:n,
    sumIADU=sumIADU+iadu(i);
end;
Valor_de_IADU=sumIADU*Ts

```

Estos son los resultados obtenidos:

Para la Estrategia 2:

Parámetros	Kp = 3.5	Kp = 1.4	Kp = 0.91
IAE	0.036031	0.064765	0.092641
ISE	3.587655e-4	0.0024023415	0.0053615855
ITAE	0.168874818	0.206900562	0.246284354
IAU	50.758424	50.68282	50.66501
IADU	65.414	34.832	27.778

Tabla 7.2 Evaluación de la estrategia 2

Como puede verse, al analizar estos parámetros se obtienen las mismas conclusiones que observando las gráficas del apartado anterior. A medida que decrece la constante proporcional del controlador, las vibraciones en la barra se hacen más patentes una vez el

cilindro a llegado a su posición deseada. Destacar que la cantidad de energía entregada a la servoválvula es prácticamente igual para los tres casos.

Para la Estrategia 3:

Kp = 3.5					
Parámetros	X = 0.3	X = 0.5	X = 0.7	X = 0.8	X = 0.9
IAE	0.030923	0.032595	0.037205	0.036541	0.178197
ISE	2.390815e-4	3.057775e-4	6.793775e-4	5.678935e-4	0.051078498
ITAE	0.14811687	0.14798311	0.152151298	0.15358548	0.340261078
IAU	50.634926	50.58907	50.624146	50.60162	50.599188
IADU	52.815	51.69	52.451	49.684	1.4047e+2

Tabla 7. 3 Evaluación de la estrategia 3

En la tabla 7.3 se observa que a medida que aumenta el valor de la constante de decisión lógica x, aumentan las vibraciones que sufre la barra elástica una vez ha llegado el cilindro a la posición deseada. Destacar que, al igual que antes, la cantidad de energía consumida es prácticamente igual para todos los casos.

Kp = 1.4			
Parámetros	X = 0.3	X = 0.5	X = 0.7
IAE	0.056543	0.053641	0.055627
ISE	0.0020345	0.0017547	0.00193087
ITAE	0.18282673	0.1764669	0.182917
IAU	50.632406	50.617378	50.631164
IADU	31.076	28.575	27.244
Kp = 1.4			
Parámetros	X = 0.8	X = 0.9	x = 1
IAE	0.055669	0.063269	0.289893
ISE	0.00226713	0.0034867775	0.036035233
ITAE	0.178256	0.18929361	0.711072686
IAU	50.623602	50.615642	50.617226
IADU	28.57	29.464	33.362

Tabla 7.4 Evaluación de la estrategia 3 (continuación)

K_p = 0.91			
Parámetros	X = 0.5	X = 0.7	X = 0.9
IAE	0.081111	0.094029	0.094057
ISE	0.0047073775	0.006316481	0.0066711935
ITAE	0.22100291	0.239680082	0.24000305
IAU	50.62505	50.631488	50.621602
IADU	24.899	24.429	23.722

Tabla 7.5 Evaluación de la estrategia 3 (continuación)

En las tablas 7.4 y 7.5 se puede observar como aumentan los errores a medida que aumenta el valor de la constante de decisión lógica x . Esto es perfectamente normal, pues en las gráficas presentadas en el apartado anterior se observa que al aumentar x , aumentan las vibraciones que sufre la barra elástica una vez ha llegado el cilindro a la posición deseada. Destacar que, al igual que antes, la cantidad de energía entregada a la servoválvula es prácticamente igual para todos los casos.

Comentario final: Si se comparan los resultados obtenidos experimentalmente con las simulaciones realizadas con Simulink, se observa:

- a) Simulink predice un nivel de vibraciones inferior al experimental en lazo abierto.
- b) Simulink predice una K_p inferior a la que se obtiene experimentalmente.

Los hechos anteriores indican que en la función de transferencia real existen términos que estabilizan el sistema, aunque no han sido observados.