

2º ITT SISTEMAS ELECTRÓNICOS  
2º ITT SISTEMAS DE TELECOMUNICACIÓN  
3º INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

# AUTÓMATAS Y SISTEMAS DE CONTROL

## PRÁCTICA 9: LEVITACIÓN MAGNÉTICA

### OBJETIVOS DE LA PRÁCTICA

- Comprobar sobre un montaje físico real la importancia de los sistemas de control:
  - Permiten hacer utilizables sistemas naturalmente inestables.
  - El cambio de los parámetros del sistema de control afecta en gran medida al comportamiento.
  - Se utilizará como ejemplo la levitación magnética, fundamento de los trenes suspendidos.
- Verificar como sistemas físicos de comportamiento complejo pueden ser aproximados con bastante fidelidad por un modelo de segundo orden:
  - Se obtendrá el sistema de segundo orden más aproximado.
  - Se comprobará la similitud con el sistema real.

### INTRODUCCIÓN: TRENES LEVITADOS MAGNÉTICAMENTE



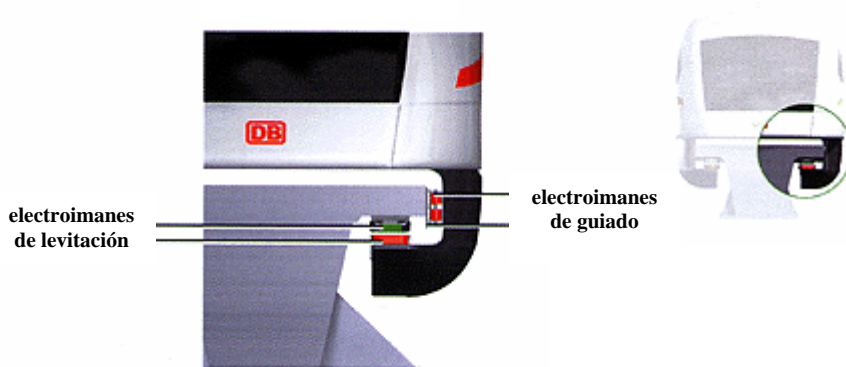
Uno de los campos actuales de investigación en el área del transporte son los trenes sustentados mediante levitación magnética. Se pretende eliminar las pérdidas por fricción características de los sistemas tradicionales haciendo que no exista contacto entre el tren y la vía. El objetivo de la práctica será plantear el problema de **control** que existe en esta tecnología.

Caben dos soluciones posibles para lograr la sustentación magnética:

- mediante repulsión magnética
- mediante atracción magnética

En la práctica nos centraremos en la segunda de las soluciones, ya que es en ella dónde la influencia del sistema de control es más importante.

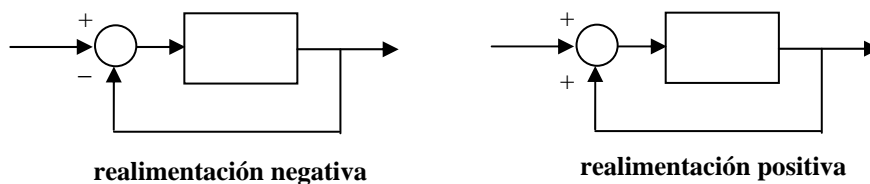
La figura siguiente muestra cómo la fuerza de **atracción** entre los electroimanes de levitación tiende a elevar el tren, compensando de este modo el efecto de su peso. Por otra parte, los electroimanes de guiado se encargan de evitar posibles desplazamientos laterales.



Centrándonos en los electroimanes de levitación, debemos ver que un sistema tal y como el que se plantea es altamente inestable. Si consideramos que la fuerza de atracción entre los imanes es inversamente proporcional a la distancia entre ellos, el equilibrio entre el peso del tren y la fuerza de atracción de los imanes sólo se producirá para una distancia determinada. Si la distancia varía debido a cualquier perturbación, por pequeña que sea, el sistema se alejará rápidamente de la situación de equilibrio de una de estas dos formas:

- Si la distancia aumenta (el tren cae ligeramente) la fuerza de levitación debida a los imanes disminuirá, con lo que el peso del tren hará que el tren caiga aún más y el desequilibrio se hará cada vez mayor... el resultado es que el tren se desploma sobre la vía.
- Si la distancia disminuye (el tren se eleva ligeramente) la fuerza de levitación debida a los imanes aumentará, con lo que sobrepasará a la fuerza correspondiente al peso y hará que el tren se eleve aún más. El resultado, como en el caso anterior, es que el desequilibrio se hace cada vez mayor y se llegará a una situación final en la que los dos imanes entren en contacto.

Un sistema como este en el que la situación de equilibrio es inestable corresponde a una **realimentación positiva**: una realimentación negativa estabiliza y una realimentación positiva desestabiliza.



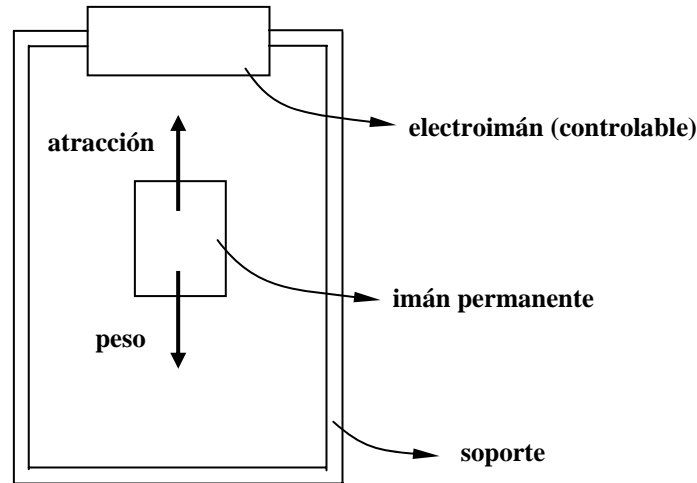
La solución radica en el **sistema de control**: es necesario medir continuamente la distancia entre los dos imanes y ajustar en consecuencia la intensidad suministrada a los electroimanes para **compensar** las pequeñas desviaciones respecto de la posición de equilibrio. Y este control hay que realizarlo **muy rápidamente**, dado que cualquier desequilibrio, positivo o negativo tiende a aumentar por sí solo debido a la existencia de una **realimentación positiva**.

## LA MAQUETA DE LA PRÁCTICA

Para la práctica se dispone de una maqueta que permite analizar cómo funcionan los distintos **sistemas de control** a la hora de resolver un problema similar al que se encuentra en un dispositivo real como puede ser un tren de sustentación magnética.

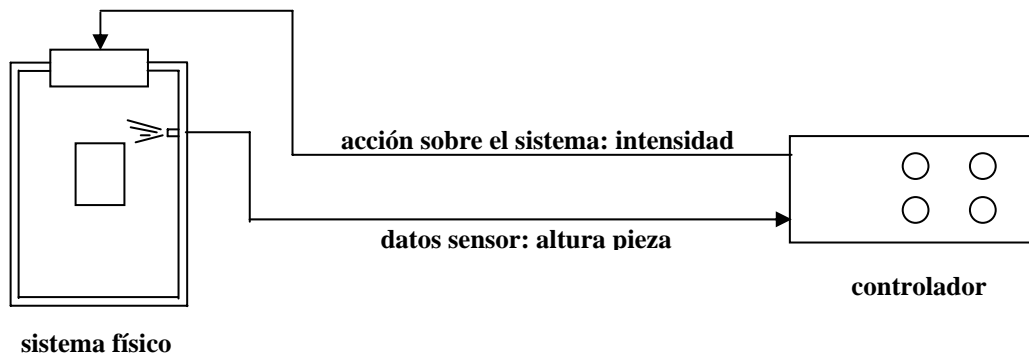
La maqueta constituye un sistema de levitación basado, al igual que el explicado para el caso de los trenes, en la repulsión magnética. En este caso se dispone de un electroimán fijo y de un imán permanente móvil que debe mantenerse suspendido en el aire.

El esquema de la maqueta es el siguiente:



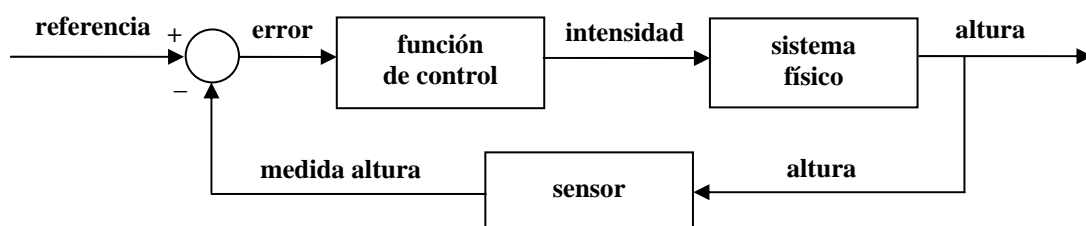
El equilibrio se produce cuando la fuerza de atracción es igual al peso de la masa suspendida. Esto, al igual que en el caso del tren, se verifica sólo cuando los dos imanes se encuentran a una distancia precisa. Si se producen perturbaciones y la distancia se modifica, es necesario actuar rápidamente sobre el electroimán para corregir la perturbación; en otro caso la pieza suspendida se desplomará o bien se elevará hasta quedar unida al electroimán superior.

El sistema físico y el controlador están conectados de la forma siguiente:



El funcionamiento de este montaje se puede explicar fácilmente: al controlador se le fija una altura de referencia para la pieza, con lo cual su objetivo será lograr que la altura real esté lo más próxima a esa referencia. El controlador recibe continuamente información sobre la altura real a la que se encuentra la pieza; en función de que esta altura sea mayor o menor que la deseada, se reduce o aumenta la intensidad que se aplica al electroimán.

Esto se corresponde con un esquema de control estándar como el siguiente:



El comportamiento de cada uno de los bloques debe quedar claro a la vista del diagrama:

- Sistema físico: representado por una función de transferencia que nos indica cómo varía la altura de la pieza ante variaciones de la intensidad en el electroimán.
- Función de control: calcula la intensidad a aplicar al electroimán en función del error (diferencia entre la altura de referencia y la altura real).
- Sensor: devuelve una señal de tensión proporcional a la altura de la pieza.

El sensor mediante el cual se mide la altura a la que se encuentra la pieza es de tipo óptico y ofrece una señal continua de tensión proporcional a la posición de la pieza. Desde el controlador se pueden variar tanto la altura de referencia o altura deseada para la pieza como los parámetros del algoritmo de control; esto último se explicará más adelante.

## 1<sup>er</sup> EXPERIMENTO: FUNCIONAMIENTO SIN SISTEMA DE CONTROL

El objetivo es comprobar cómo el levitador, en ausencia de un sistema de control, tiene un comportamiento **inestable**. Para ello mantendremos la fuente de alimentación apagada, con lo cual el sistema de control no actuará e intentaremos situar el imán móvil en un punto tal que se mantenga en equilibrio (la forma de colocar el imán será con su lado abierto hacia abajo).

Haciendo diversas pruebas comprobaremos cómo en posiciones excesivamente bajas la fuerza de atracción es insuficiente para vencer la gravedad y el imán se caerá; mientras que en posiciones excesivamente altas la fuerza de atracción será superior a la de la gravedad y el imán tenderá a elevarse. Existirá un punto en el que las fuerzas se equilibren, pero será imposible encontrarlo exactamente. Debe quedar claro que es necesario un **sistema de control**.

## 2<sup>o</sup> EXPERIMENTO: FUNCIONAMIENTO CON SISTEMA DE CONTROL

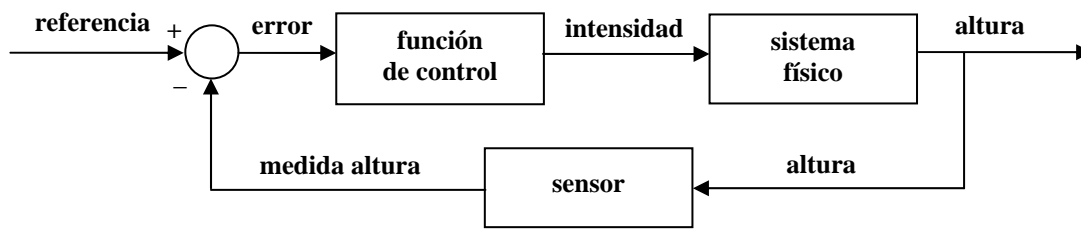
En este segundo experimento se activará el sistema de control y veremos como el comportamiento del levitador pasa a ser **estable**. Lo primero será realizar los siguientes ajustes en el controlador (antes de encenderlo):

- **Mando de ajuste de referencia SP (Set Point)**  
Es el mando blanco. Se puede ajustar de modo continuo desde la posición de separación mínima (L o low) hasta la posición de separación máxima (H o high) pasando por la posición media (M). Para esta primera prueba se dejará en la posición media.
- **Mandos de ajuste de los parámetros del controlador (P, I, D)**  
Son los tres mandos azules graduados. Determinan el comportamiento del controlador. Para esta primera prueba se fijarán en los siguientes valores:
  - **P: 8**
  - **I: 0.4**
  - **D: 0.4**

El interruptor **INT/EXT** (control interno o externo) se fijará en la posición **INT**; y el interruptor **RANDOM SIGNAL** (señal de prueba aleatoria) se fijará en la posición **OFF**. Estos interruptores no se utilizarán durante la práctica.

Una vez todo ajustado, se deberá encender el controlador mediante el interruptor situado en su parte posterior. Los leds de la parte frontal se iluminarán. Con el controlador activo, se repetirá la prueba del experimento anterior: se intentará situar el imán móvil en un punto de equilibrio. En este caso debe apreciarse, antes de soltar el imán, como existe una pequeña zona de estabilidad en la que el imán no tiene tendencia ni a elevarse ni a descender. Una vez encontrada esa zona se deberá soltar el imán delicadamente y observaremos como queda suspendido en el aire. El sistema de control está actuando.

Una vez comprobado como el sistema de control es capaz de contrarrestar las pequeñas perturbaciones presentes en el sistema, probaremos el efecto de variar la posición de referencia. A continuación se reproduce de nuevo el esquema de control del levitador:



Debemos recordar que la referencia es el valor al cual el controlador intenta hacer llegar la salida del sistema, buscando que la señal de error (referencia menos salida) tienda a cero. Variaremos la referencia moviendo el mando SP y comprobaremos como el sistema reacciona inmediatamente ajustando la altura de la pieza móvil.

**Nota:** en algunos equipos se pueden producir inestabilidades, particularmente si el cambio de la referencia se realiza muy bruscamente. Las inestabilidades pueden ser de tres tipos:

- La pieza móvil se desploma.
- La pieza móvil se eleva hasta unirse al electroimán superior.
- La pieza inicia una oscilación creciente.

La razón por la que se puede producir cualquiera de estos fenómenos es que los parámetros del controlador deben ajustarse específicamente para cada valor de la referencia, si se desea un comportamiento óptimo. Con los parámetros del controlador se experimentará en pruebas posteriores.

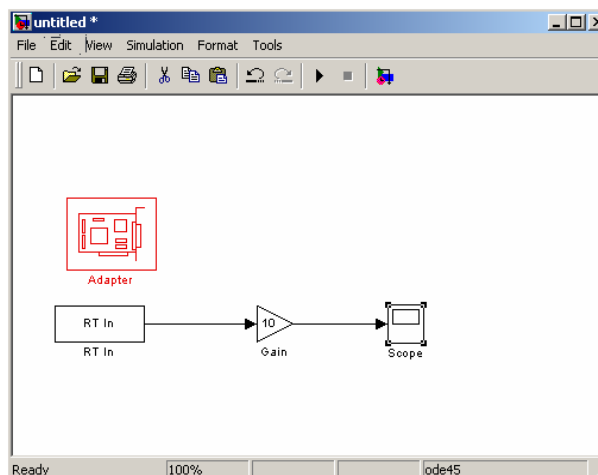
### 3<sup>er</sup> EXPERIMENTO: CAPTURA SEÑAL DE SALIDA

En los experimentos anteriores no se ha tomado ninguna medida. A continuación registraremos la señal que indica la posición de la pieza móvil e intentaremos ver el tipo de comportamiento que se obtiene ante una entrada de tipo escalón. Utilizaremos la tarjeta de adquisición de datos del PC que se describe en un **Anexo** al final de la práctica.

Para esta prueba, ajustaremos los parámetros del controlador a los siguientes valores:

- **P:** 8
- **I:** 0
- **D:** 0.2

En el PC, deberemos crear un esquema Simulink con un bloque **RT In**, un bloque **Gain** para convertir valores y un **osciloscopio** para ver la señal. También será necesario incluir el adaptador (**Adapter**):



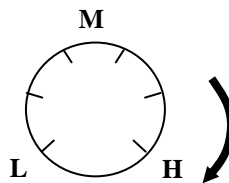
La forma de llevar los datos del sensor de posición al PC se describe en el anexo donde se explica el funcionamiento de la tarjeta de adquisición de datos.

La configuración del bloque **RT In** será la siguiente:

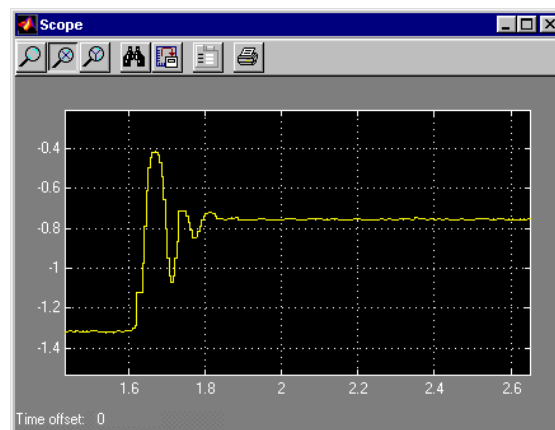
- Tiempo de muestreo (sample time): por ahora **0.005** segundos.
- Canal a utilizar (adapter channel): **1**

De acuerdo con el diagrama de bloques del sistema mostrado anteriormente, la entrada será la señal de referencia y la salida la señal de altura. Para estudiar el comportamiento del sistema, se introducirá una entrada de tipo escalón, o lo que es lo mismo, se variará bruscamente la referencia. Los resultados obtenidos no serán del todo precisos, ya que al introducir el escalón manualmente el cambio de una referencia a otra no es instantáneo. Esto significa que si hacemos distintas pruebas los resultados no serán iguales.

En cualquier caso, para hacer un poco más precisa la introducción manual de los escalones, el movimiento del mando de referencia se hará siempre entre la marca anterior a la posición máxima y la posición máxima (H), que coincide con el tope del mando:



No se utilizarán escalones de mayor amplitud (más de una marca) porque lógicamente serían menos instantáneos y además podrían provocar inestabilidades. En una prueba realizada correctamente se debería obtener una gráfica similar la que se muestra:



A la vista de la respuesta a escalón, puede verse cómo el levitador se comporta de modo similar a un sistema de segundo orden subamortiguado. En el último ejercicio de la práctica realizaremos una identificación buscando el sistema de segundo orden más parecido al levitador y mediremos los errores cometidos con esa aproximación.

## PARÁMETROS DEL CONTROLADOR

El controlador utilizado por el sistema es del tipo PID, donde las iniciales corresponden a:

- **P:** efecto **proporcional**
- **I:** efecto **integral**
- **D:** efecto **diferencial**

**Efecto proporcional:**

Genera una acción de control proporcional al error. Es el efecto más corriente y más intuitivo: si el error es positivo (altura excesivamente baja), es necesario aumentar la intensidad sobre el electroimán; si es negativo (altura excesiva) será necesario reducir la intensidad. Existe una constante de proporcionalidad que llamaremos  $K_P$  que relaciona el error con la acción de control, de modo que para errores grandes las variaciones de intensidad serán también grandes. Si llamamos  $e(t)$  a la señal de error y  $i(t)$  a la acción sobre el sistema (intensidad a aplicar al electroimán), quedará:

$$i(t) = K_P \cdot e(t)$$

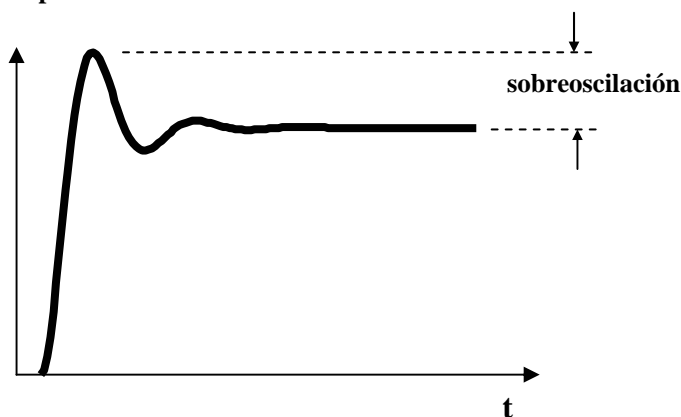
**Efecto integral:**

En algunos casos, la aplicación de un efecto proporcional no consigue que el sistema alcance el valor de referencia indicado, aún después de un prolongado periodo de tiempo. Se dice que el sistema presenta **error en régimen permanente**. En estos casos la mejor opción es recurrir a un efecto integral, que no actúa en función del error sino en función de la **integral del error**. De este modo, mientras la referencia no sea alcanzada la integral del error no parará de crecer, y con ella la acción de control sobre el sistema, hasta que la acción sea suficiente para llevar al sistema al punto deseado. La constante propia del efecto integral se denominará  $K_I$ , con lo que la relación entre error y acción de control será:

$$i(t) = K_I \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt$$

**Efecto diferencial:**

Este efecto busca conseguir un comportamiento más suave del sistema de control. Utilizando exclusivamente los efectos anteriores, la forma de alcanzar el valor de referencia puede ser excesivamente brusca, presentando **picos de sobreoscilación** excesivos.



Para evitar este problema, se introduce un efecto extra que es el efecto diferencial: la acción de control es proporcional a la derivada de la señal de error. Esto evita que el sistema pase de largo la referencia: si la derivada del error es negativa (nos acercamos a la referencia) el efecto derivativo ‘frena’ ligeramente la acción de control. La constante propia de un efecto derivativo se denomina  $K_D$ ; y la expresión resultante queda:

$$i(t) = K_I \cdot \frac{d}{dt} e(t)$$

Un controlador PID presenta los tres efectos simultáneamente:

$$i(t) = K_P \cdot e(t) + K_I \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt + K_D \cdot \frac{d}{dt} e(t)$$

El **ajuste** o la **sintonización** de un regulador consiste en elegir los valores para  $K_P$ ,  $K_I$  y  $K_D$  que consiguen un funcionamiento adecuado del sistema (en términos de tiempo de respuesta aceptable, pico de sobreoscilación aceptable, etc). En esta práctica no se utilizará un procedimiento analítico para llegar a

obtener el valor de estos parámetros, sino que nos limitaremos a comprobar experimentalmente los resultados obtenidos para distintos valores de cada una de estas variables.

## 4º EXPERIMENTO: MODIFICACIÓN $K_D$ CONTROLADOR

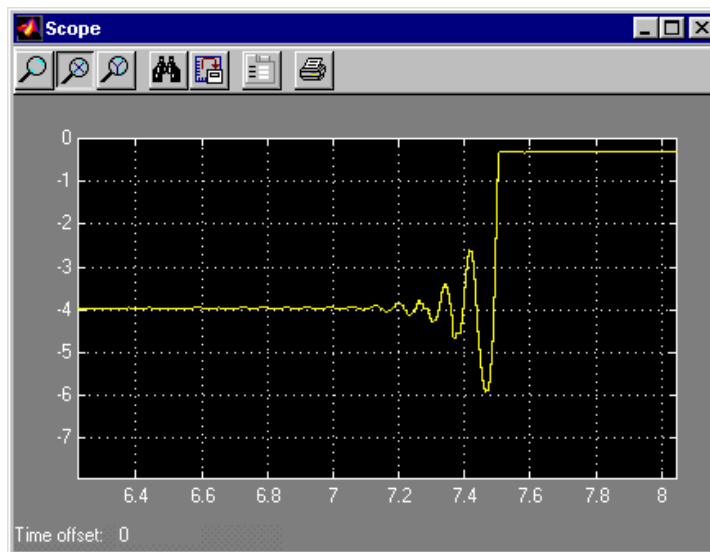
El efecto diferencial es, como hemos visto, el responsable de la dinámica con la que el sistema responde a las variaciones de la referencia (intenta ‘suavizar’ el comportamiento del sistema). En este experimento partiremos de un valor inicial máximo para la variable  $K_D$  (constante del efecto diferencial) e iremos disminuyendo su valor progresivamente. El efecto será que la respuesta irá presentando progresivamente mayor sobreoscilación hasta llegar a un punto en el que la respuesta será inestable.

### 1. Respuesta ante perturbaciones

En este experimento se pretende ver cómo aún en ausencia de entrada (sin modificar la referencia) el sistema se puede inestabilizar sólo por el efecto de las perturbaciones. Para hacer este experimento, fijaremos la referencia en el valor  $M$  y los parámetros  $P$ ,  $I$  y  $D$  en los siguientes valores:

- **P:**     **8**
- **I:**     **0**
- **D:**     **0.4**

A continuación lanzaremos la simulación y durante la misma iremos variando lentamente el mando  $D$  desde **0.4** hasta **0**. El resultado será que antes de llegar a cero el sistema se inestabilizará. La gráfica resultante debería tener un aspecto como el siguiente:



Se debe apreciar cómo el sistema se inestabiliza aún sin entrada aplicada. El motivo de la inestabilidad son las pequeñas perturbaciones que existen en el sistema.

Si en el equipo de prácticas no se alcanza la inestabilidad incluso llevando el parámetro  $D$  a 0, se repetirá el experimento exactamente igual pero fijando el parámetro  $P$  a 9 o 10 si es necesario.

### 2. Respuesta ante entrada escalón

Representaremos sobre el osciloscopio de Simulink la respuesta del sistema a escalón para distintos valores de  $K_D$ . La forma de registrar la respuesta a escalón será la misma que la explicada en el apartado anterior.

Los valores de los parámetros  $P$  e  $I$  permanecerán fijos durante el experimento. Serán:

- **P:**     **8**



- **I: 0**

El parámetro **D** tomará dos valores elegidos entre **0.4** y **0** a partir de los resultados observados en el experimento anterior. El objetivo es que la respuesta a escalón sea significativamente distinta en uno y otro caso: para un valor bajo (0.1) de parámetro **D** la respuesta debe presentar mucha sobreoscilación y para un valor alto (0.4) muy poca sobreoscilación.

### 5º EXPERIMENTO: MODIFICACIÓN $K_P$ CONTROLADOR

Un exceso de acción proporcional también puede hacer que el sistema presente mucha sobreoscilación e incluso inestabilidad. Se realizarán dos experimentos similares a los del ejercicio anterior.

#### 1. Respuesta ante perturbaciones

Al igual que en el experimento anterior, fijaremos la referencia en el valor **M** y los parámetros **P**, **I** y **D** en los siguientes valores:

- **P: 5**
- **I: 0**
- **D: 0.15**

A continuación lanzaremos la simulación y durante la misma iremos variando lentamente el mando **P** desde **5** hasta **10**. El resultado será que antes de llegar a 10 el sistema se inestabilizará. En el caso de que esto no suceda se repetirá el experimento con un valor menor de la constante  $K_D$  (mando **D**).

#### 2. Respuesta ante entrada escalón

Los valores de los parámetros **D** e **I** permanecerán fijos durante el experimento. Serán:

- **D: 0.15**
- **I: 0**

El parámetro **P** tomará dos valores elegidos entre **5** y **10** a partir de los resultados observados en el experimento anterior. El objetivo es que la respuesta a escalón sea significativamente distinta en uno y otro caso: para un valor alto (9) de parámetro **P** la respuesta debe presentar mucha sobreoscilación y para un valor bajo (5) muy poca sobreoscilación.

### 6º EXPERIMENTO: MODIFICACIÓN $K_I$ CONTROLADOR

Como se ha dicho, el objetivo del efecto integral es eliminar el error en régimen permanente. Para comprobar esto compararemos las respuestas de un sistema con efecto integral y otro sin él.

Para la primera simulación ajustaremos los siguientes parámetros:

- **P: 10**
- **I: 0**
- **D: 0.2**

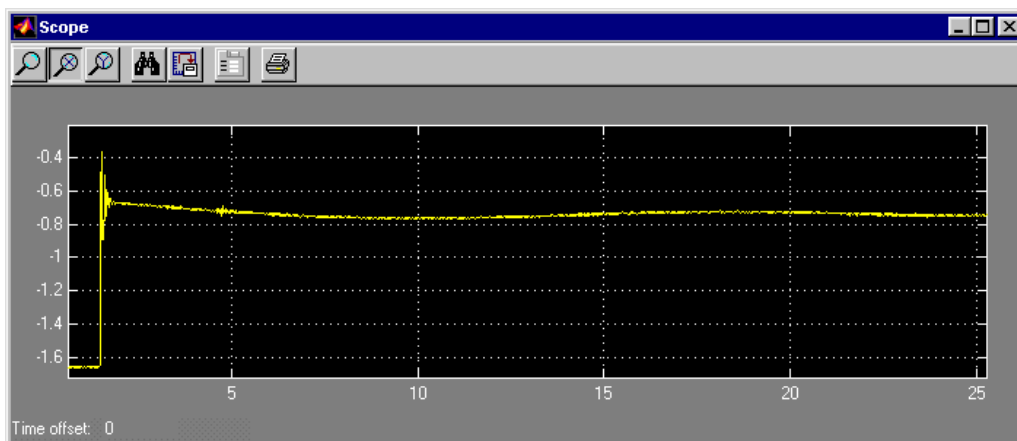
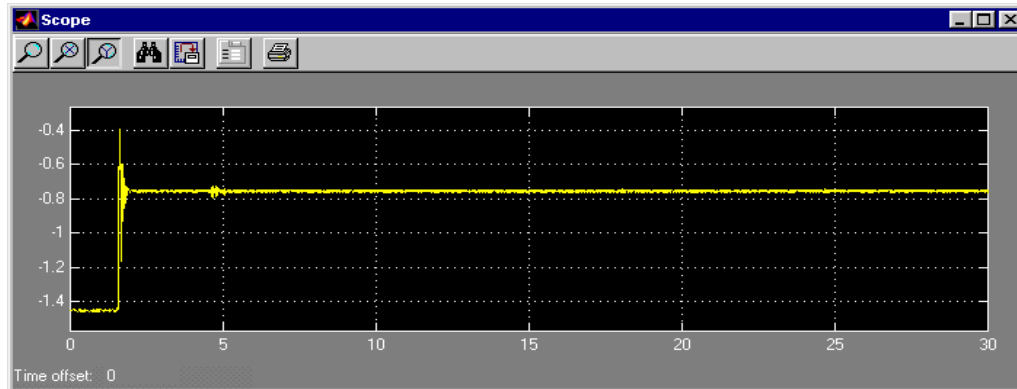
Y simularemos el sistema durante al menos 20 segundos, para asegurarnos de que tras introducir el escalón se alcanza el régimen permanente.

Para la segunda simulación los parámetros serán:

- **P: 10**
- **I: 0.5**
- **D: 0.2**

Y utilizaremos también un tiempo de simulación de 20 segundos. La respuesta ante el escalón es similar en los primeros instantes pero cuando el sistema **sin** efecto integral (primera simulación) adquiere el régimen permanente el sistema **con** efecto integral (segunda simulación) continúa variando. Lo que se está produciendo es que este segundo sistema sí llega a la posición de referencia pedida, mientras que el primero no lo hace.

Los gráficos de una y otra respuesta deben tener un aspecto como el siguiente:



## 7º EXPERIMENTO: IDENTIFICACIÓN LEVITADOR

Intentaremos identificar el levitador como un sistema de segundo orden (aunque sea una aproximación) estudiando su respuesta a escalón. Los parámetros que utilizaremos para la identificación serán los siguientes:

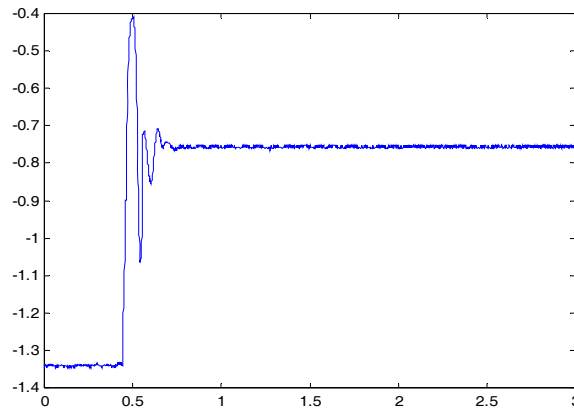
- **P:**     **8**
- **I:**     **0**
- **D:**     **0.2**

Y el escalón lo generaremos como en otras ocasiones variando la referencia entre la penúltima y la última marca. En este caso un tiempo de simulación de 10 segundos será suficiente.

Antes de realizar la simulación se marcará la opción '**save data to workspace**' del bloque **Scope** para que los datos numéricos resultado de la simulación sean accesibles desde una variable Matlab y se pueda trabajar con ellos posteriormente.

- Antes de realizar la simulación definitiva para tomar los datos de la identificación, se reducirá el tiempo de muestreo (sample time) del bloque **RT In** a **0.001 seg**. Para que este tiempo de muestreo tan rápido no produzca errores por falta de velocidad del hardware, durante el experimento se mantendrá oculto el bloque Scope (no se mostrará el gráfico) de modo que se consuman menos recursos del sistema.

Una vez llevados los datos a Matlab, con la instrucción **plot** se debe obtener un resultado similar al que se muestra:



Buscaremos el sistema de segundo orden más parecido al levitador. Para ello mediremos sobre la respuesta los siguientes parámetros:

- Ganancia en régimen permanente
- Tiempo de pico de sobreoscilación
- Sobreoscilación

Con los resultados obtenidos y aplicando las fórmulas conocidas por teoría, llegaremos a la expresión de una función de transferencia de segundo orden que puede representar el comportamiento del sistema de forma aproximada. Se considerará que el escalón introducido es de valor uno dado que la referencia se ha modificado en una unidad (el mando se ha movido de una marca a la marca contigua).

Una vez obtenida la función de transferencia intentaremos ver cuál es el error que se comete con la aproximación. Esto lo haremos representando sobre un mismo gráfico de Matlab la respuesta del levitador y la respuesta a escalón de la función de transferencia que se ha obtenido como resultado.

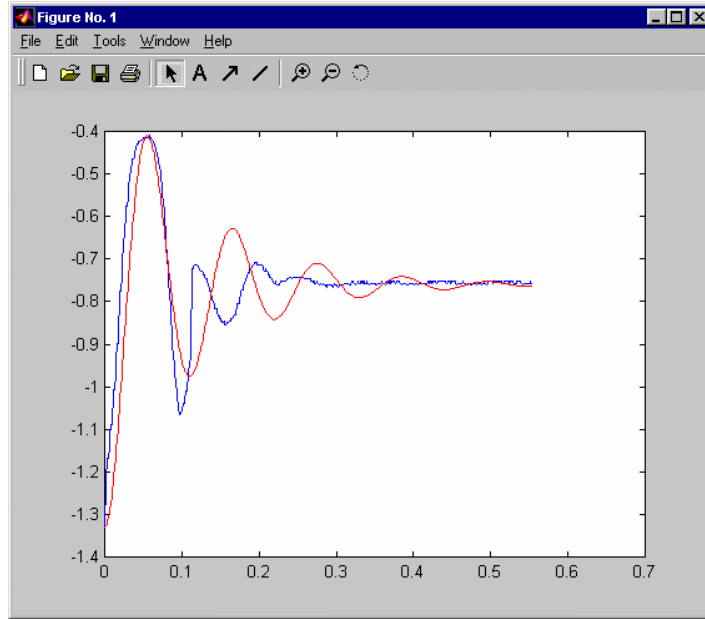
Las instrucciones a utilizar serán:

- **tf** para crear una función de transferencia en Matlab
- **step** para obtener la respuesta a escalón de la función de transferencia anterior
- **plot** para mostrar en un gráfico la respuesta a escalón del sistema real y la respuesta obtenida con step.

Nota: entre los dos comandos **plot** debe emplearse la instrucción **hold** para que el segundo gráfico no borre al primero.

Nota: para que las bases de tiempos sean iguales se deben hacer dos cosas: En primer lugar, recortar la variable tiempo de forma que sólo se trabaje sobre los valores que interesan: desde el momento en que la señal comienza a cambiar (cuando se aplica el escalón) hasta que la respuesta se ha estabilizado (debe presentar un tramo horizontal). En segundo lugar, utilizar esa variable tiempo recortada como base de tiempos para la instrucción **step**.

El resultado debe ser similar al que se muestra:



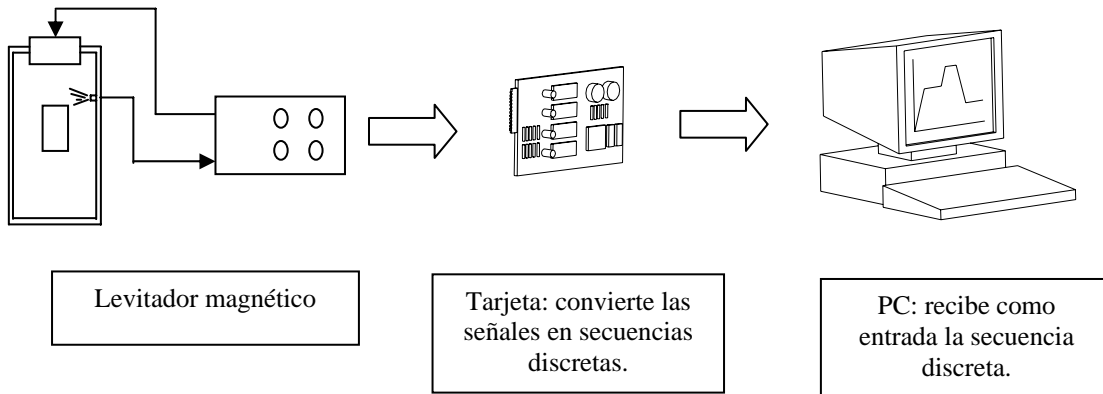
Se aprecia cómo el sistema real no es exactamente un segundo orden, pero se aproxima bastante.

## ANEXO: USO DE LA TARJETA DE ADQUISICIÓN

### 1.Introducción.

En este anexo se detalla la utilización de una tarjeta de adquisición de datos conectada al PC para la recogida de datos procedentes del levitador magnético.

La siguiente figura muestra la forma de recibir datos sobre la posición del imán en el levitador en el PC:



La tarjeta actúa como un muestreador, transforma una señal continua en una señal discreta. El elemento que realiza este proceso se denomina convertidor analógico/digital o convertidor A/D.

Como referencia se detallan algunos datos acerca de la tarjeta de adquisición de datos a utilizar en esta práctica.

#### **Características de la tarjeta ACL – 8112PG**

- Bus AT (interfaz ISA)
- 16 canales de entrada con masa común o bien 8 diferenciales
- Ganancia programable de x1, x2, x4, x8 y x16
- Circuito integrado de muestreo y retención (sample&hold)
- 2 canales de salida analógicos de 12 bits monolíticos multiplexados
- 16 canales de entrada digital y 16 de salida digital
- 3 contadores independientes de cuenta atrás de 16 bits
- Frecuencia de muestreo programable de hasta 100KHz
- Tres modos de disparo del convertidor A/D: disparo por software, disparo programable mediante temporizador/contador y disparo mediante pulso externo.
- Capacidad para trabajar mediante interrupción: 11 niveles de interrupción (IRQ3 a IRQ15) seleccionables mediante jumper
- Conector de 37 pines tipo D
- Tamaño compacto (half – size PCB)

#### **Especificaciones de la tarjeta ACL – 8112PG**

- Entrada analógica (A/D)
  - Convertidor A/D: B.B. ADS774 (aproximaciones sucesivas)
  - Canales de entrada: 16 con masa común o bien 8 diferenciales
  - Resolución: 12 bits
  - Rango de entrada (controlados por software): Bipolar de  $\pm 10V$ ,  $\pm 5V$ ,  $\pm 2.5V$ ,  $\pm 0.625V$  y  $\pm 0.3125V$  (a menor rango mayor resolución)
  - Tiempo aproximado de conversión:  $8\mu s$

- Protección de sobretensión:  $\pm 35V$  DC
  - Precisión: 0.015% de la lectura  $\pm 1$  bit
  - Impedancia de entrada:  $10M\Omega$
  - Modos de disparo: por software, por temporizador/contador y disparo externo
  - Modos de transferencia: por software, por interrupción y por DMA
  - Velocidad de transferencia de datos (frecuencia de muestreo): 100KHZ (máximo)
- Salida analógica (D/A)
    - Canales de salida: 2 salidas analógicas con doble buffer
    - Resolución: 12 bits
    - Rango de salida: unipolar de 0 a 5V o 0 a 10V mediante referencia interna y unipolar de +10V o -10V con referencia externa
    - Convertidor D/A: B.B. DAC7541 de multiplexación monolítica
    - Tiempo de conversión: 30 $\mu$ s
    - Linealidad:  $\pm 1/2$  bit LSB
    - Intensidad máxima:  $\pm 5mA$
  - Entradas y salidas digitales (DIO)
    - Canales: 16 de entrada y 16 de salida compatibles TTL
    - Tensión de entrada: mínimo de 0V y máximo de 0.8V para estado 0 y mínimo de +2.0V para estado 1
    - Carga admisible: +0.5V a -0.2mA máximo para estado 0 y +2.7V a +10mA máximo para estado 1
    - Tensión de salida: mínimo de 0V y máximo de 0.4V para estado 0 y mínimo de +2.4V para estado 1
  - Contador programable
    - Dispositivo: 8254
    - Temporizador para conversión A/D: temporizador de 32 bits (dos contadores de 16 bits en cascada) con base de tiempos de 2MHz
    - Contador: un contador de 16 bits con base de tiempos de 2MHz
    - Frecuencia de salida del temporizador: de 0.00046 Hz a 0.5 MHz

Para realizar la conexión con los dispositivos se utiliza una tarjeta adicional conectada mediante un cable de 37 hilos a la ACL - 8112PG. Dicha tarjeta adicional consiste en una especie de regleta donde se puede acceder fácilmente a cada uno de los canales y que aporta la electrónica necesaria para acondicionar las señales. La disposición de los distintos canales y señales se muestra en la siguiente figura:

PIN	DESCRIPCIÓN
1 a 8	Canal 0 a 7 de entrada analógica
9 – 10	Masa de los canales 1 a 8 de entrada analógica
11	Referencia de tensión externa 2
13	Salida de +12 V
14	Masa de los canales de entrada analógica
15	Masa de los canales de salida digital
16	Señal de salida del contador 0
17	Señal de disparo externo
18	No conectada
19	+5V
20 a 27	Canal 8 a 15 de entrada analógica
28 – 29	Masa de los canales 8 a 15 de entrada analógica
30	Canal 0 de salida analógica
31	Referencia de tensión externa 1
32	Canal 1 de salida analógica
33	Entrada de reloj para 8254
34	Entrada para 8254

35 – 36	No conectada
37	Entrada de señal de reloj externo
38	Masa de los canales de salida analógica

En la práctica que nos ocupa, sólo utilizaremos dos pines: el pin 1 como entrada analógica y el pin 9 como masa.

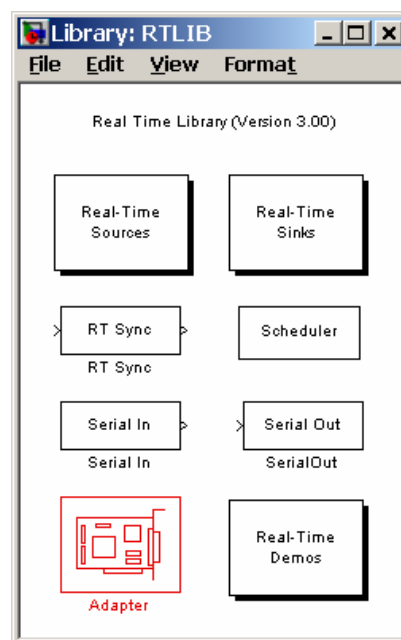
## 2. Software para el manejo de la tarjeta.

La forma más sencilla de utilizar la tarjeta de adquisición (sin necesidad de programar) es mediante un toolbox de Matlab denominado 'Extended Real Time Toolbox'. Este paquete permite trabajar con la tarjeta de adquisición de datos directamente desde Matlab e incluso desde esquemas Simulink, ofreciendo así una gran potencia y facilidad en la etapa de desarrollo de un sistema de control.

El Extended Real Time Toolbox (en adelante RTT) permite la comunicación directa entre el sistema de adquisición de datos y Matlab / Simulink; es decir, permite acceder a la tarjeta desde la línea de comando de Matlab o directamente desde un esquema Simulink. Por su simplicidad, se elegirá la segunda opción de forma que se pueda acceder directamente a la tarjeta desde Simulink. Para ello el RTT dispone de una librería de bloques Simulink que realizan dicha tarea. Dicha librería se denomina Real Time Toolbox Simulink Block Library (a partir de ahora RTLIB) y provee los bloques Simulink necesarios para comunicar el entorno (en nuestro caso el motor) con la tarjeta.

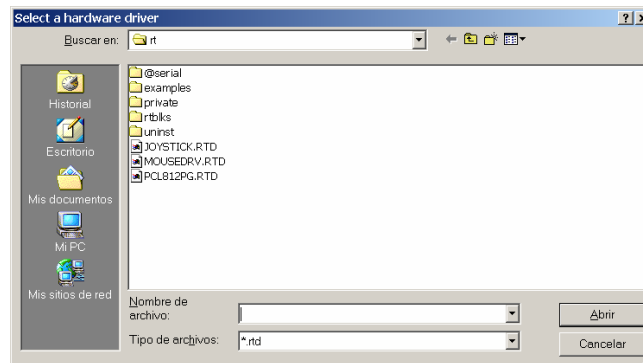
La utilización de la RTLIB en un esquema Simulink pasa por dos fases: primero la inclusión y configuración del driver del hardware de nuestra tarjeta y segundo la correcta utilización de los diferentes bloques de entrada/salida en tiempo real.

El acceso a dicha librería se puede realizar de dos formas: directamente desde Simulink o desde la línea de comandos de Matlab mediante el comando `rtlib`. Puesto que el acceso a la RTLIB desde Simulink difiere dependiendo de la versión de Matlab/Simulink, accederemos a dicha librería mediante el comando `rtlib`. Al ejecutar dicho comando aparecerá un ventana de Simulink como la que se muestra en la siguiente figura:



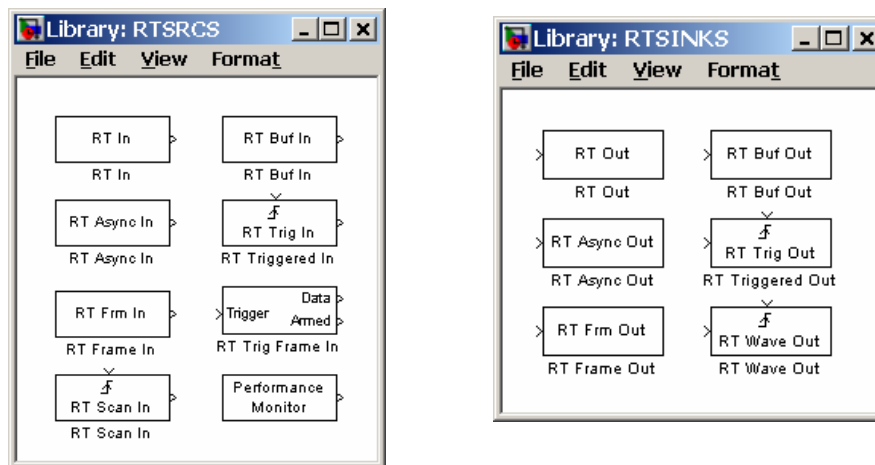
A partir de aquí abriremos un nuevo esquema Simulink y podemos comenzar a trabajar con los bloques de la RTLIB. El primer paso es incluir en nuestro esquema un bloque adaptador. El bloque *Adapter* es un bloque que representa la tarjeta de adquisición de datos y hace las veces de driver o interfaz entre Simulink y la tarjeta. Se utiliza para disponer dentro del esquema Simulink de los canales de la tarjeta de adquisición de datos. Una vez incluido dicho bloque en el esquema Simulink, lo primero que hay que

hacer es configurar el mismo para que utilice el driver de la tarjeta que poseemos. Para ello haremos doble clic con el ratón sobre el mismo y se abrirá una ventana como la que se muestra:



En nuestro caso, el driver que debemos cargar es el correspondiente al fichero PCL812PG.RTD, para ello lo seleccionamos y pulsamos 'Aceptar'. A partir de este momento ya tenemos cargado en nuestro esquema Simulink los drivers de la tarjeta ACL – 8112PG con las opciones por defecto. En el caso de querer cambiar dichas opciones haremos de nuevo doble clic sobre el bloque *Adapter* y se abrirá una ventana de selección de parámetros. En principio y a menos que se indique lo contrario, se trabajará con las opciones del driver por defecto por lo que no será necesario realizar este último paso (se pulsará OK sin cambiar ningún parámetro).

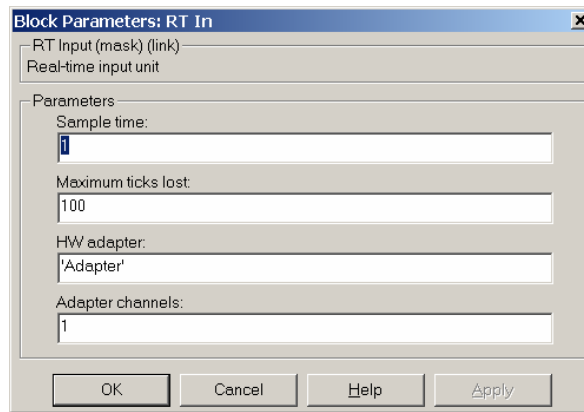
Ahora ya podemos empezar a utilizar los bloques de entrada/salida de la librería. Se dispone de dos tipos de bloques: *sources* y *sinks*. Para acceder a los mismos haremos doble clic sobre los bloques *Real – Time Sources* o *Real – Time Sinks* respectivamente. De esta forma aparecerán las ventanas correspondientes tal y como se muestra en la siguiente figura:



Como se puede apreciar aparecen multitud de bloques tanto en una como en otra ventana. En esta práctica sólo utilizaremos el bloque 'RT In'.

El bloque 'RT In' está diseñado para la adquisición de datos en tiempo real. Para configurar este bloque haremos doble clic sobre el mismo, apareciendo así una ventana como la que se muestra a continuación:





Veamos los parámetros configurables:

- *Sample Time*: especifica el periodo de muestreo al cual se debe realizar la adquisición de los datos.
- *Maximum ticks lost*: especifica el máximo número de ‘tics’ (muestreos) que se pueden perder antes de mostrar un mensaje de error. Esto es un mecanismo de “seguridad” para asegurar que la adquisición se ha realizado de forma correcta (no ha habido excesivas pérdidas de datos) ya que hay que tener en cuenta que este sistema en tiempo real se ejecuta sobre Matlab y Simulink, y éstos a su vez sobre Windows por lo que cabe la posibilidad de que en un determinado instante el sistema esté tan cargado que no se pueda realizar la adquisición con la frecuencia correcta. Esto, claro está, depende tanto de la potencia del microprocesador como de la cantidad de recursos de la máquina que están ocupados (aplicaciones, ventanas abiertas, etc.).
- *HW adapter*: indica el nombre del bloque *Adapter* incluido en el esquema Simulink. Esto es así pues cabe la posibilidad de tener en un mismo esquema más de un adaptador para gestionar dos sistemas de adquisición distintos.
- *Adapter channels*: especifica el canal analógico de entrada al que se quiere acceder. En este caso tendremos 8 canales numerados del 1 al 8 correspondiendo a los canales de entrada analógica 0 a 7 de la tarjeta de adquisición.

### 3. Niveles de tensión utilizables

Tal y como está configurada la tarjeta, los rangos de tensión utilizables son los siguientes:

- Tensiones de entrada aceptables: **entre -10 y +10 V**

En cualquier caso, el rango de tensiones de salida y de entrada soportables por la tarjeta se transforma en un rango de -1 a 1 en los bloques del RTT. Esto implica realizar transformaciones entre los valores que aparecen en Simulink y las tensiones reales que se obtendrán en la tarjeta.

Si leemos desde un bloque de entrada *RT In* un valor de 0.5 (en una escala de -1 y 1), éste corresponderá a una tensión de 5 V (en una escala de -10 a +10). Por tanto es necesario realizar después del bloque de entrada la transformación siguiente:

$$V_{tarjeta} = V_{simulink} \cdot 10$$

Esta transformación se realizará en Simulink mediante un bloque de ganancia *Gain* (librería *Math*):



#### 4. Esquema de simulink para la lectura de la señal procedente del levitador magnético.

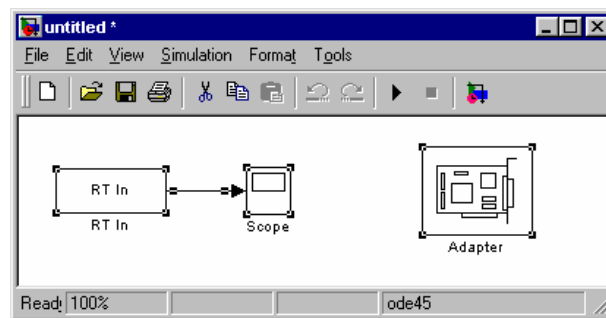
A continuación, se construirá un esquema Simulink que permita recoger en el PC la señal ofrecida por el levitador magnético, a través de los canales de adquisición de datos de la tarjeta.

En particular, realizaremos las siguientes conexiones:

- Conectaremos el pin 1 del conector ADAM 3937 (salida del sensor de la altura del levitador) al pin 1 de la tarjeta de adquisición de datos (positivo del 1<sup>er</sup> canal de entrada analógica)
- Conectaremos el pin 20 del conector ADAM 3937 (masa del sensor de la altura del levitador) al pin 9 de la tarjeta de adquisición de datos (masa del 1<sup>er</sup> canal de entrada analógica)

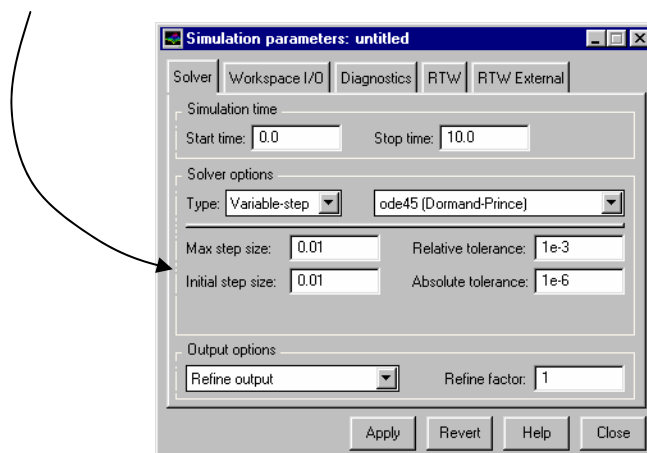
De este modo, el 1er canal de entrada analógica de la tarjeta estará adquiriendo continuamente los valores de tensión que le devuelve el levitador.

A continuación se debe construir el esquema Simulink que permita recoger esos datos desde la tarjeta y visualizarlos en el PC. El bloque a utilizar para recoger datos es el bloque RT In (entrada de datos desde la tarjeta al PC) y los datos los visualizaremos mediante un osciloscopio, tal y como muestra el siguiente esquema:



Antes de lanzar la simulación se deberán ajustar los parámetros de los bloques y de la propia simulación:

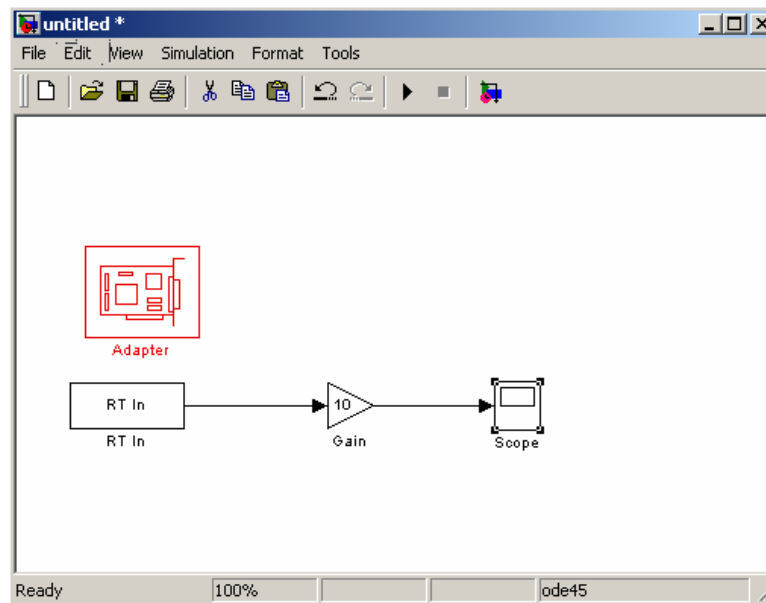
- Para el bloque **RT In** se fijarán los siguientes parámetros:
  - periodo de muestreo (sample time) = 0.005 seg. Se recogerán datos del sensor cada 0.005 seg.
  - Canal de entrada (adapter channel) = 1. Se recogerán datos del primer canal de entrada (es donde se ha conectado la señal)
- Para la **simulación**, se fijarán algunos parámetros particulares que supondrán un mejor funcionamiento:
  - **Max step size** se fijará a 0.005 seg (el mismo valor que el periodo de muestreo elegido)
  - **Initial step size** se fijará también a 0.005 seg.



Ahora conectaremos el levitador magnético y lanzaremos la simulación. Debemos observar cómo se refleja la posición del imán para cada instante de tiempo en el osciloscopio del esquema Simulink..

Será conveniente lanzar simulaciones con tiempos de simulación del orden de 10 seg. para tener tiempo suficiente para realizar pruebas.

Si nos fijamos en los valores que aparecen en el osciloscopio de matlab podremos comprobar como no se corresponden con los valores reales de tensión que mediríamos realmente con un voltímetro. La razón es que no hemos incluido la función que transforma valores Simulink a valores reales sobre la tarjeta. A continuación modificaremos el esquema para incluir esta función. Recordemos que el bloque a utilizar es *Gain* de la librería *Math*. El aspecto del esquema debe ser el siguiente:



Si se lanza de nuevo la simulación se podrá comprobar cómo ahora los datos si se reflejan correctamente en el osciloscopio.

# INFORME DE LA PRÁCTICA 9

NOMBRE: \_\_\_\_\_ APELLIDOS: \_\_\_\_\_

DNI: \_\_\_\_\_ TITULACIÓN: \_\_\_\_\_

FIRMA: \_\_\_\_\_

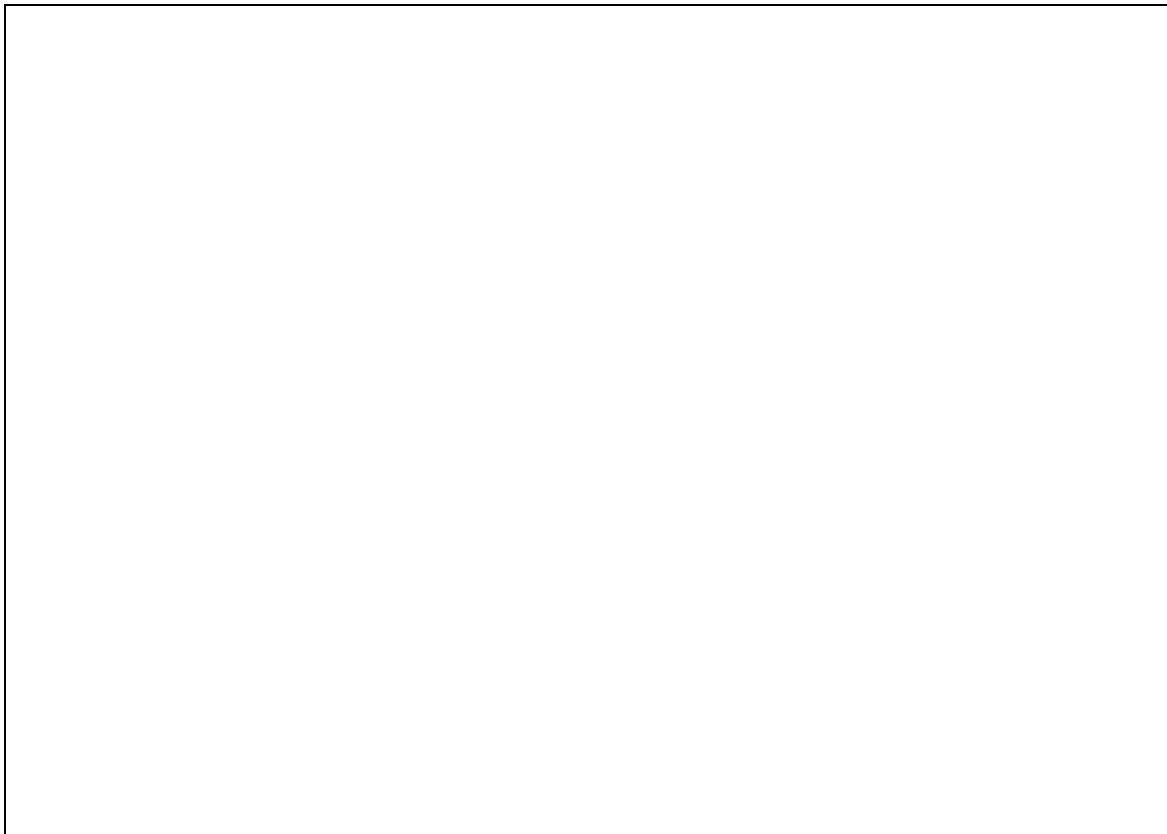
Nota: El objetivo de la práctica es que el alumno entienda los efectos más importantes que se producen al variar las constantes P, I y D del control. Resumimos algunas ideas a continuación:

- Aumentar la constante P del controlador generalmente tiende a hacer el sistema más oscilatorio. En nuestro caso el sistema puede llegar a ser inestable, con lo que la pieza magnética caerá.
- Aumentar la constante D del controlador provoca que el sistema sea menos oscilatorio.
- Aumentar la constante I produce un sistema algo más oscilatorio e inestable. Por el contrario, el control I permite reducir el error en régimen permanente.

En la mayoría de las ocasiones los parámetros de un regulador PID se ajustan *in situ* sobre la planta, utilizando el conocimiento de los conceptos comentados.

## 3er Experimento: Captura de la señal de salida

Dibuje aproximadamente la señal de salida obtenida como respuesta a escalón. Se utilizará el bloque **To Workspace** en lugar del bloque **Scope**.



## 4º Experimento: Modificación Kd controlador

### 1. Respuesta ante perturbaciones

Dibuje aproximadamente un gráfico de la señal de salida al variar progresivamente D. ¿Cuál es el valor límite de D para el cual el sistema se hace inestable (aproximadamente)?

### 2.- Respuesta ante entrada escalón

Obtenga la respuesta ante escalón para dos valores de D lo suficientemente separados (y siendo el sistema estable para los dos valores).

- Indique los valores de D elegidos.  $D1 = \underline{\hspace{2cm}}$      $D2 = \underline{\hspace{2cm}}$
- Describa cuál es la diferencia fundamental entre las dos salidas ante entrada escalón.

## 5º Experimento: Modificación Kp controlador

### 1. Respuesta ante perturbaciones

Dibuje aproximadamente el gráfico de la señal de salida al variar progresivamente P. ¿Cuál es el valor límite de P para el cual el sistema se hace inestable (aproximadamente)?

### 2. Respuesta ante escalón

Obtenga la respuesta ante escalón para dos valores de P lo suficientemente separados (y siendo el sistema estable para los dos valores).

- Indique los valores de P elegidos. P1 = \_\_\_\_\_ P2 = \_\_\_\_\_
- Describa cuál es la diferencia fundamental entre las dos salidas ante entrada escalón.

## 6º Experimento: Modificación Ki controlador

Dibuje de forma aproximada los gráficos de la señal de respuesta para los valores de I propuestos (superpuestos en la misma gráfica).



## 7º Experimento: Identificación del sistema

Se deben calcular los siguientes valores (medidos sobre la gráfica de la respuesta):

- Ganancia en régimen permanente: \_\_\_\_\_
- Tiempo de pico: \_\_\_\_\_
- Sobreoscilación: \_\_\_\_\_

A partir de los valores anteriores y utilizando las fórmulas aproximadas ya conocidas, proponga el sistema de 2º orden que mejor aproxime esta respuesta:

$G(s) = \text{-----}$

Superponga las dos respuestas utilizando Matlab. Dibuje de forma aproximada el gráfico con las dos respuestas, real y simulada superpuestas.

