

Proyecto 1 – Diseño de un control digital de velocidad para un vehículo

1. Descripción de la planta y del sistema de control

El objetivo de este proyecto es controlar la velocidad del vehículo mostrado en la figura 1. Dicho vehículo está construido en configuración diferencial mediante el *kit Mindstorms* de LEGO. Consta de una estructura o chasis que usa como base el dispositivo NXT, dos ruedas de tracción accionadas por sendos motores DC y un punto de apoyo esférico en la parte trasera.



Figura 1: vehículo construido con LEGO

El sistema de control determina la tensión que debe aplicarse a cada motor (derecho e izquierdo) para conseguir el valor deseado para la velocidad del vehículo. La tensión común $V_c = (V_{dcha} + V_{izq})/2$ aplicada a ambos motores define la velocidad de avance del vehículo.

Modelo de velocidad

La velocidad del vehículo se calcula a partir de la medida de la posición angular de los motores (*encoders*) empleando la siguiente estrategia:

- La posición angular se registra con un período de muestreo igual a 5 ms.
- La velocidad se calcula por diferencias finitas: resta de dos medidas consecutivas de la posición angular dividida por el período de muestreo.
- Se filtra el cálculo de la velocidad mediante un filtro de primer orden de constante de tiempo igual a 200 ms.

La necesidad del filtrado está motivada por la resolución finita en la medida de la posición que suministra el *encoder* (1°). Si por ejemplo, el período de muestreo es 5 ms y la velocidad vale $100^\circ/\text{s}$ ($0.5^\circ/5 \text{ ms}$), el *encoder* acumularía una variación de posición angular en cada período de muestreo que oscilaría entre 0° y 1° . El cálculo de la velocidad también oscilaría entre $0^\circ/\text{s}$ y $200^\circ/\text{s}$. Por lo tanto, el cálculo de la velocidad a partir de la medida del *encoder* requiere de un filtrado para extraer el valor medio.

Por lo tanto, el modelo lineal que se va a utilizar es:



Implantación del control

Se usarán los siguientes formatos para la función de transferencia del control PID:

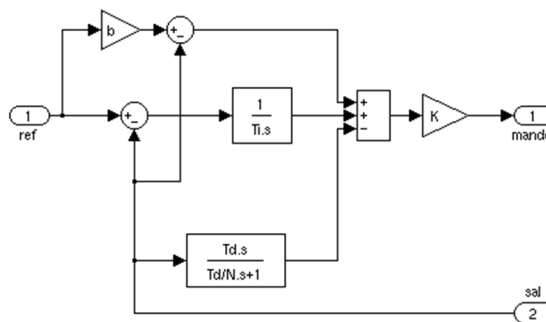
- Formato serie $C(s) = K_p \frac{(1+Is)}{Is} \frac{(1+Ds)}{(1+fDs)}$: se utiliza para diseñar el control.
- Formato paralelo $C(s) = K \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1 + \frac{T_d}{N} s} \right)$: se utiliza para implantar el control.
- Las relaciones entre parámetros de uno y otro formato vienen dadas por:

$$\mu = 1 + (1-f) \frac{D}{I} \quad K = \mu K_p \quad T_i = \mu I$$

$$T_d = \left(\frac{1}{\mu} - f \right) D \quad N = \frac{1}{\mu f} - 1 \quad K_I = K_p / I = K / T_i$$

Si se supone, como es habitual, $D \leq I$, $f < 1$, μ varía entre 1 y 2.

- El diagrama de bloques general que se usará para la implantación de los controles en formato paralelo es el siguiente:



La acción diferencial puede aplicarse sobre la salida (como aparece en la figura) o sobre el error. Se ha incluido una ponderación de valor b de la referencia en la parte proporcional del control. El diagrama de bloques anterior debe discretizarse con el método especificado en cada caso.

- Se aplicará un control PID digital en formato paralelo y controles *dead beat* para la velocidad del vehículo mediante el fichero de Simulink suministrado (**VELOCIDAD.slx**). En este fichero se definirá el tipo de control, sus parámetros, el período de control y el método de discretización empleado. El sistema de control programado en Simulink se descarga en el dispositivo NXT mediante un cable USB. Las variables de interés pueden registrarse y los parámetros del control modificarse en tiempo real mediante un enlace bluetooth.

- El período de muestreo empleado en el registro de las señales es 5 ms, por lo cual cualquier período de control que se utilice en el equipo deberá ser múltiplo de éste.

2. Objetivos y organización del proyecto

Organización del proyecto

Este proyecto está organizado en cuatro partes que deberán realizarse en tres sesiones:

- ***Parte 1: Identificación del modelo de la planta.*** En esta parte se identificará la función de transferencia entre la tensión común aplicada a los motores y la velocidad de avance del vehículo. Esta función de transferencia permitirá diseñar diferentes controles de velocidad.
- ***Parte 2: Control P e influencia del período de control.*** En esta segunda parte se diseñará un control P y se analizará la influencia que el período de control tiene sobre la respuesta del sistema. Además, se comprobará cómo se puede compensar dicha influencia durante la fase de diseño del control. El procedimiento de diseño se programará en un fichero de Matlab.
- ***Parte 3: Control PID y método de discretización.*** Se diseñarán un control PID de velocidad por respuesta en frecuencia. El procedimiento de diseño se programará en el mismo fichero de Matlab creado previamente, teniendo en cuenta el efecto del período de control.
- ***Parte 4: Controles dead beat.*** Se diseñarán dos controles dead beat de primer y segundo orden para la velocidad del vehículo. En cada caso debe determinarse el período de control más adecuado. El procedimiento de diseño se programará en el mismo fichero de Matlab creado previamente.

3. Puesta en marcha del equipo

A continuación, se describen los pasos que hay que seguir para poner en marcha el equipo, y que se deberán realizar en cada sesión de laboratorio:

1. Encender el ordenador, entrar con la clave y usuario propios.
2. Copiar todos los ficheros requeridos de Matlab desde la página web de la asignatura a la carpeta D:\TEMP\Proyecto1XXX, donde XXX es la denominación del grupo.
3. Arrancar MATLAB (Programas\DEA\Matlab R2015a). Cambiar el directorio de trabajo a la carpeta creada en D:\TEMP\Proyecto1XXX.
4. Abrir el modelo **VELOCIDAD.slx**.
5. Para desplazarse por los diferentes subsistemas del modelo, debe utilizarse el explorador del modelo que aparece en la ventana izquierda del diagrama de bloques.
6. Conectar el dispositivo NXT al ordenador mediante un cable USB.
7. Encender el dispositivo NXT (pulsar el botón naranja) y agregarlo con el nombre que aparece en la pantalla del NXT como nuevo dispositivo bluetooth utilizando como clave 1234 (pulsar de nuevo el botón naranja antes de introducir la clave en el ordenador). Anotar el puerto COM asignado de salida.

8. En **Tools > Run on target > Options**, seleccionar el modo externo (opción “Bluetooth connection”) para la operación del dispositivo NXT, especificando manualmente el puerto de salida anotado previamente.
9. Abrir el osciloscopio denominado *Velocidad* dentro del subsistema de monitorización, maximizar la ventana correspondiente y ocultarlo para acceder de nuevo al diagrama de bloques.
10. Generar el código para la ejecución en tiempo real mediante el botón **Play** de color verde, si se desea registrar las señales, o la opción **Deploy to Hardware**, si no se desea registrar las señales. Una vez descargado el programa (en la pantalla del NXT aparece el mensaje “I am running”), desconectar el cable USB.
11. Al comenzar la ejecución del código, el vehículo no responderá hasta que se pulse el botón de color naranja en la parte frontal del dispositivo NXT. **No pulsar el botón de color gris situado justo debajo del botón de color naranja, mientras esté activo el modo externo** (registro de señales). Debe detenerse la ejecución del control en el botón de **STOP** en el menú superior del modelo de Simulink.
12. Al pulsar el botón naranja, el control actuará procurando seguir la referencia de velocidad definida.
13. No se deben modificar las escalas del osciloscopio durante la ejecución en tiempo real. Sólo se debe comprobar que las señales se registran correctamente y en el momento en el que la longitud del registro es adecuada detener la ejecución con el botón **STOP**.
14. Si por una alguna operación incorrecta el dispositivo NXT no responde, se debe desconectar y volver a conectar la batería que hay en la parte trasera del dispositivo.

4. Primera parte: Identificación del modelo de la planta

El objetivo es identificar el modelo de la planta utilizando como entradas la tensión común aplicada a ambos motores y el par de fricción asociado a la rampa (en Voltios equivalentes del motor) y como salida la velocidad del vehículo. Se supone que la función de transferencia de la planta es de primer orden $K_{m_v}/(T_{m_v}s+1)$, si se desprecia la constante de tiempo eléctrica del motor. Para ello, se deben realizar los siguientes pasos:

1. Aplicar una secuencia de escalones en la tensión común de los motores entre 2 y 4 V y periodo igual a 1 s a la entrada del subsistema **Calcula mandos**, anulando la tensión diferencial (salvo que sea necesaria para que el coche siga una trayectoria recta). El periodo de control debe ser 5 ms. Esta forma de onda y el período de muestreo vienen definidos por defecto en el modelo. Este ensayo debe realizarse exclusivamente en la zona plana del circuito.
2. Si el vehículo no avanza en línea recta, ajustar manualmente en el subsistema **Calcula mandos** la tensión diferencial necesaria (señal *mando_giro*) para corregir la asimetría de los motores.
3. Registrar la salida y el mando del control de velocidad desde el comienzo del ensayo con el vehículo parado.
4. Guardar los datos del ensayo con el nombre **DatosIdentVelXXX.mat**, donde XXX es el nombre del grupo. Utilizar el comando *save*.
5. La variable **Velocidad** se guarda por defecto en formato *array*: la primera columna de la matriz es el tiempo, la segunda columna es la referencia de

velocidad, la tercera columna es la medida de la velocidad y la última columna es el mando. Por ejemplo, para representar gráficamente las variables se usa el comando **plot(Velocidad(:,1), Velocidad(:,2:4))**.

6. Identifíquense, a partir de este ensayo, el modelo más adecuado de segundo orden (primer orden + filtro) mediante un ajuste por mínimos cuadrados. La entrada debe ser el mando (tensión común de los motores) y la salida debe ser la velocidad medida. La entrada y la salida ya se definen así al ejecutar el fichero **prep_datos_velocidad.m** en el paso 8.
7. El modelo paramétrico (primer orden + filtro) que se pretende identificar se define en el fichero **sistema_velocidad.mdl**. Se utiliza un tercer parámetro que representa la suma de la caída de tensión interna en el circuito de alimentación y el par de fricción en V equivalentes del motor.
8. Las señales se recortan usando el fichero **prep_datos_velocidad.m**. Deben seleccionarse varios escalones de subida y bajada **simultáneamente** para obtener un modelo medio y comenzando con el vehículo parado para identificar correctamente todos los parámetros. El instante inicial a la hora de recortar las señales debe seleccionarse justo antes de que comience a cambiar la velocidad del vehículo.
9. Se ejecuta **ajuste_velocidad.m** y se obtienen los parámetros.
10. Una vez realizada la identificación, representar en un mismo gráfico la respuesta real, la obtenida con el modelo y la diferencia entre ambas. Este gráfico se genera automáticamente al ejecutar el fichero **ajuste_velocidad.m** en el paso 8.
11. Los parámetros estimados deben además introducirse en la máscara del simulador del vehículo **SIM_VELOCIDAD.slx**. Este modelo de simulación permitirá, durante el transcurso de la práctica, comparar cómodamente un ensayo real y la simulación correspondiente con el mismo sistema de control.

5. Segunda parte: Control P e influencia del período de control

En esta parte se programará un fichero con extensión .m en Matlab que permita diseñar por respuesta en frecuencia un control P para la velocidad del vehículo. Los diseños que se realicen se analizarán, tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia, mediante el interfaz para análisis de sistemas lineales de Matlab (comando **ltiview**), se probarán en el vehículo real y se contrastarán los resultados con el simulador disponible en la página web de la asignatura (fichero **SIM_VELOCIDAD.slx**).

Trabajo previo

1. Revisar el método de diseño de controles PID por respuesta en frecuencia introducido en la asignatura de Regulación Automática. Recuperar y llevar al laboratorio los ficheros .m que se emplearon para diseñar controles en el laboratorio de dicha asignatura.

Trabajo de laboratorio

Se deben realizar los siguientes pasos:

1. Se debe utilizar el **modelo lineal de la planta identificado previamente**. Los parámetros de este modelo deben definirse en la cabecera del fichero .m de Matlab empleado para realizar el diseño de todos los controles.
2. Diseñar un control proporcional con margen de fase de 60 grados, usando el modelo analógico puro. Verificar que el lazo abierto cumple la especificación de diseño.
3. Utilizando como criterio el retraso de fase que introduce en la pulsación de cruce un retardo de la mitad del periodo de muestreo, analícese si los períodos de muestreo 5 ms, 40 ms y 100 ms son pequeños, medianos o grandes.
4. Para cada uno de estos tres períodos de muestreo, y con el control P diseñado, realizar un ensayo de la respuesta del vehículo sobre el circuito (tren de escalones en la referencia entre 0.05 y 0.15 m/s). Guardar los datos con el nombre **ControlPXXX_MAP_tsYYms.mat** (comando *save*), donde XXX es el nombre del grupo e YY es el período de muestreo utilizado en ms.
5. Con el período de muestreo de 40 ms y empleando el modelo analógico modificado, ajustar de nuevo el control P para conseguir el mismo margen de fase que con el diseño en tiempo continuo.
6. Para el control P anterior, realizar un ensayo de la respuesta del vehículo sobre el circuito (tren de escalones en la referencia entre 0.05 y 0.15 m/s). Guardar los datos con el nombre **ControlPXXX_MAM_ts40ms.mat** (comando *save*), donde XXX es el nombre del grupo.

Análisis de resultados

7. Comparar el mando y la velocidad de cada ensayo realizado durante la sesión práctica con los resultados obtenidos mediante simulación utilizando el modelo de Simulink **SIM_VELOCIDAD.slx**. Deben actualizarse el modelo y el control de velocidad en el diagrama de Simulink para que dicha comparación sea válida.
8. Para cada uno de los tres períodos de muestreo, y con el control P diseñado utilizando el modelo analógico puro, obténganse los índices de respuesta temporal (tiempo de pico, sobrepaso, tiempo de alcance, tiempo de establecimiento al 5% y error en el seguimiento de la referencia) y respuesta en frecuencia (margen de fase, pulsación de cruce, margen de ganancia, pulsación de oscilación, pico de resonancia, pulsación de resonancia, pulsación de corte y máxima sensibilidad) empleando:
 - a. El modelo analógico puro (no influye el período de muestreo).
 - b. El modelo analógico modificado con un retardo de la mitad del periodo de muestreo.
 - c. Un modelo exacto mixto de la implantación digital (control en tiempo discreto y planta en tiempo continuo) para los índices de respuesta temporal y un modelo digital exacto para los índices de respuesta en frecuencia.

Con esta comparación, y en función del período de muestreo, se pretende:

- a. Valorar cuantitativamente la influencia de la implantación digital del control usando como referencia el sistema en tiempo continuo.
- b. Evaluar la aproximación usada en el modelo analógico modificado como representación de dicha influencia en la fase de diseño del control.

9. Para el control P diseñado con período de muestreo igual a 40 ms y usando el modelo analógico modificado, obténganse los índices de respuesta temporal (tiempo de pico, sobrepaso, tiempo de alcance, tiempo de establecimiento al 5% y error en el seguimiento de la referencia) y respuesta en frecuencia (margen de fase, pulsación de cruce, margen de ganancia, pulsación de oscilación, pico de resonancia, pulsación de resonancia, pulsación de corte y máxima sensibilidad) empleando:
 - a. El modelo analógico modificado con un retardo de la mitad del periodo de muestreo.
 - b. Un modelo exacto mixto de la implantación digital (control en tiempo discreto y planta en tiempo continuo) para los índices de respuesta temporal y un modelo digital exacto para los índices de respuesta en frecuencia.
10. Organizar todos los índices de respuesta temporal y respuesta en frecuencia calculados durante la práctica en una tabla para poder compararlos más rápidamente.
11. Añadir los controles diseñados (pasos 2 y 5), las comparaciones entre ensayos y simulaciones (paso 8) y la tabla de índices (paso 10) a un documento breve con conclusiones y enviarlo por correo al profesor del laboratorio antes del comienzo de la sesión 2 del proyecto.

6. Tercera parte: Control PID y método de discretización

En esta parte se incluirá en el fichero de Matlab creado previamente el diseño por respuesta en frecuencia de un control PID de velocidad. Los diseños que se realicen se analizarán mediante el interfaz para análisis de sistemas lineales de Matlab (comando **ltiview**), se probarán en el vehículo real y se contrastarán los resultados con el simulador disponible en la página web de la asignatura (fichero **SIM_VELOCIDAD.slx**).

Trabajo de laboratorio

Se deben realizar los siguientes pasos:

1. Diseñar un control PID serie. Cada grupo debe definir las especificaciones que considere convenientes teniendo en cuenta que el control se implanta digitalmente con un período de control igual o superior a 30 ms. Convertir al formato paralelo y analizar si es preferible aplicar la acción diferencial a la salida o al error. Verificar que el lazo abierto cumple la especificación de diseño tanto con el formato serie como el formato paralelo del control.
2. Ajustar la ponderación de la referencia para optimizar la respuesta a un escalón unitario en referencia.
3. Discretizar el control anterior empleando (t_s es el período de control):

- a. Regla de la derivada en retraso: $\frac{1}{s} = \frac{t_s}{1 - z^{-1}}$

b. Regla trapezoidal: $\frac{1}{s} = \frac{t_s}{2} \frac{(1+z^{-1})}{(1-z^{-1})}$

4. Para el control PID anterior y ambos métodos de discretización, realizar un ensayo de la respuesta del vehículo sobre el circuito (tren de escalones en la referencia entre 0.05 y 0.15 m/s). Guardar los datos con el nombre **ControlPIDXXX_ts30ms_mdYY.mat** (comando *save*), donde XXX es el nombre del grupo e YY es el método de discretización empleado (DR o TR).

Análisis de resultados

5. Comparar el mando y la velocidad para los dos ensayos realizados durante la sesión práctica con los resultados obtenidos mediante simulación utilizando el modelo de Simulink **SIM_VELOCIDAD_RA.slx**. Deben actualizarse el modelo y el control de velocidad en el diagrama de Simulink para que dicha comparación sea válida.
6. Obtener los índices de respuesta temporal y respuesta en frecuencia del PID diseñado con ambos métodos de discretización empleando:
 - a. El modelo analógico modificado con un retardo de la mitad del periodo de muestreo (no influye el método de discretización).
 - b. Un modelo exacto mixto de la implantación digital (control en tiempo discreto y planta en tiempo continuo) para los índices de respuesta temporal y un modelo digital exacto para los índices de respuesta en frecuencia.
7. Organizar todos los índices de respuesta temporal y respuesta en frecuencia calculados durante la práctica en una tabla para poder compararlos más rápidamente.
8. Añadir el control diseñado (pasos 1 y 2), las comparaciones entre ensayos y simulaciones (paso 5) y la tabla de índices (paso 6) al informe previo con conclusiones adicionales y enviarlo por correo (en formato PDF) al profesor del laboratorio antes del comienzo de la sesión 3 del proyecto.

7. Cuarte parte: Controles dead beat

En esta cuarte parte se incluirá en el fichero de Matlab creado previamente el diseño en tiempo discreto de controles dead beat de primer y segundo orden. Los diseños que se realicen se analizarán mediante el interfaz para análisis de sistemas lineales de Matlab (comando **ltiview**), se probarán en el vehículo real y se contrastarán los resultados con el simulador disponible en la página web de la asignatura (fichero **SIM_VELOCIDAD.slx**).

Trabajo de laboratorio

Se deben realizar los siguientes pasos:

1. Obtener un modelo digital exacto del conjunto retenedor, planta y muestreador para periodos de control crecientes (resolución de 5 ms) hasta garantizar que la planta es inversamente estable.

2. Diseñar un control *dead beat* de orden 1 y error nulo al escalón que alcance el valor de referencia en un periodo de control. Comprobar el efecto del periodo de control, analizando la respuesta real entre muestras y el comportamiento del mando. Determinar el mejor control posible de este tipo.
3. Diseñar un control *dead beat* de orden 2 y error nulo al escalón sin cancelación del cero de la planta. Comprobar el efecto del periodo de control, analizando la respuesta real entre muestras y el comportamiento del mando. Determinar el mejor control posible de este tipo.
4. Comprobar el funcionamiento de los controles *dead beat* diseñados previamente con un ensayo sobre el equipo (tren de escalones en la referencia de velocidad entre 0.1 y 0.15 m/s).

Análisis de resultados

5. Comparar el mando y la velocidad de ambos ensayos con los resultados obtenidos mediante simulación utilizando el mosdelo de Simulink **SIM_VELOCIDAD.slx**. Deben actualizarse el modelo y el control de velocidad en el diagrama de Simulink para que dicha comparación sea válida.
6. Obtener los índices de respuesta temporal y respuesta en frecuencia de los controles *dead beat* diseñados empleando un modelo exacto mixto de la implantación digital (control en tiempo discreto y planta en tiempo continuo) para los índices de respuesta temporal y un modelo digital exacto para los índices de respuesta en frecuencia.
7. Organizar todos los índices de respuesta temporal y respuesta en frecuencia calculados durante la práctica en una tabla para poder compararlos más rápidamente.
8. Añadir el control diseñado (pasos 1 y 2), las comparaciones entre ensayos y simulaciones (paso 5) y la tabla de índices (paso 6) al informe previo con las conclusiones adicionales sobre el dead beat y las conclusiones finales de todo el proyecto y enviarlo por correo (en formato PDF) al profesor del laboratorio antes del comienzo de la sesión 3 del proyecto.

8. Examen y competición

En la cuarta y última sesión del proyecto se realizará un examen con Matlab y Simulink sobre el contenido del proyecto con una parte individual (75% de la calificación) y otra parte en grupo (25% de la calificación). Las preguntas de ese examen se corresponden con las cuestiones que se plantean en este documento, por lo que se recomienda responder de forma minuciosa a todas ellas. Durante el examen se puede emplear todo el material que se desee, tanto documentos como software.

A continuación del examen, se realizará una competición donde cada grupo decidirá el control que desea emplear con el fin de minimizar la siguiente función de coste durante un ensayo de seguimiento a una referencia de velocidad (tren de escalones entre 0.1 y 0.15 m/s):

$$V = \sum |e[k]| + a \sum |u[k]|$$

siendo $e[k]$ el error de control, $u[k]$ el mando aplicado y a un factor que se definirá más adelante . Estos valores se evalúan cada 5 ms durante todo el ensayo.