

Proyecto 2 – Diseño de un control digital para un vehículo equilibrista

1. Descripción de la planta

Se desea controlar el ángulo de cabeceo y la velocidad del vehículo equilibrista mostrado en la figura 1. El objetivo final es que el vehículo pueda recorrer un circuito cerrado en el menor tiempo posible.

El vehículo está construido mediante el *kit Mindstorms* de LEGO y está provisto de dos motores DC que accionan las ruedas. Los sensores empleados para estabilizar el cabeceo del vehículo son un giróscopo de un solo eje, un acelerómetro de tres ejes y sendos *encoders* incrementales para medir la posición del rotor de cada motor con una resolución de 1 grado. El giróscopo mide la velocidad angular de cabeceo y permite estimar el ángulo de cabeceo. El acelerómetro mide las componentes de la gravedad en un sistema de referencia solidario al vehículo, con el fin de estimar su inclinación. Mediante los *encoders* es posible calcular la velocidad angular de cada motor y, a partir de éstas, la velocidad de avance y la velocidad angular de giro del vehículo. Para que el vehículo pueda recorrer un circuito cerrado se utilizan dos sensores EOPD que permiten estimar la distancia y orientación del vehículo con respecto a la pared del circuito.

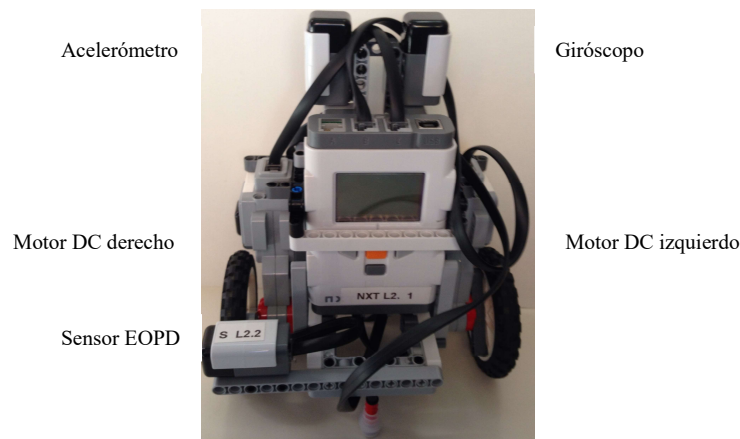


Figura 1: vehículo equilibrista construido con LEGO

En primer lugar, se analizará la conveniencia o no de aplicar un control PID para equilibrar el vehículo. Posteriormente, se diseñará, como alternativa al control anterior, un control digital por realimentación de estado para equilibrar el vehículo y controlar su velocidad de avance. Además, se diseñará un control de la distancia del vehículo con respecto a la pared del circuito para que el vehículo pueda recorrerlo. 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 para el registro de las señales será igual a 5 ms y el período de control será múltiplo del anterior.

2. Objetivos

Después de realizar esta práctica, el alumno debe estar capacitado para:

- Conocer las limitaciones de los controles PID en ciertos sistemas y cómo superar dichas limitaciones mediante un control por realimentación de estado.
- Diseñar un control digital por realimentación de estado con seguimiento de consigna, seleccionando la ubicación más adecuada de los polos en lazo cerrado.
- Planificar y coordinar diferentes sistemas de control con el fin de optimizar la operación de un sistema.

3. Trabajo en el Laboratorio

1. *Modelo matemático del vehículo equilibrista*

En la página web de la asignatura hay disponible un documento que describe el modelo matemático del vehículo equilibrista a partir de las ecuaciones cinemáticas y dinámicas de las ruedas y el chasis. Los parámetros mecánicos se han obtenido a partir de un modelo CAD del vehículo. Este modelo permite determinar las dimensiones, la posición del centro de gravedad, las masas de las distintas partes y los momentos de inercia con respecto a los ejes principales. Los parámetros del modelo CAD son los siguientes:

- Masa del chasis (Kg): 0.6 kg.
- Masa de la rueda + rotor (Kg): 0.034 kg.
- Momento de inercia de cabeceo (Kg.m^2): 1.425×10^{-3} .
- Momento de inercia de la rueda + rotor (Kg.m^2): $3.2 \times 10^{-6} + 3.75 \times 10^{-3}$.
- Distancia vertical desde el eje de la rueda al c.d.g. (m): 0.073.
- Distancia entre ruedas (m): 0.15.
- Radio de la rueda (m): 40.8×10^{-3} .

Además, se emplearán los siguientes valores de los parámetros para los motores:

- Resistencia: 4.5 Ω .
- Constante eléctrica (V.s) o constante mecánica (N.m/A): 0.01.
- Par máximo de fricción en el eje de la rueda (N.m): 0.05.
- Fricción viscosa referida al eje de la rueda (N.m.s): 1.42×10^{-2} .
- Relación del sistema de engranajes: 48.

El modelo matemático en Simulink (ver figura 2) para control de avance y cabeceo se suministra para su utilización en el transcurso de este proyecto (fichero *segway.slx*). Este fichero contiene la implantación en Simulink de la representación de estado no lineal detallada en la sección 2.1 del documento *Modelo_segway.docx*. La única entrada del modelo es la tensión común aplicada a los motores. Las variables de estado son, por este orden, la velocidad de avance (m/s), la velocidad angular de cabeceo (rad/s) y el ángulo de cabeceo (rad). Las variables de salida coinciden con las variables de estado. El efecto del par de fricción interno de los motores también se ha modelado con el fin

de que pueda incluirse en la simulación, siendo el par de fricción máximo un parámetro más del modelo. Este modelo se emplea con un doble objetivo:

- Simular la respuesta no lineal del vehículo equilibrista en diferentes condiciones.
- Linealizar el modelo en un determinado punto de operación para el diseño de controles.

A partir de la información suministrada, se pide:

- Añadir al fichero de Matlab (*CONTROL_SEGWAY.m*) donde se definen los parámetros el punto de operación correspondiente a la posición vertical del vehículo, con velocidad de avance nula, y linealizar el modelo en dicho punto de operación. A la hora de linealizar el modelo, es necesario anular el par de fricción máximo (parámetro del modelo). Dar las matrices de la representación de estado del modelo linealizado.
- Calcular los polos (autovalores de la matriz de estado) del modelo linealizado y justificar a partir de ellos el comportamiento inestable del vehículo.

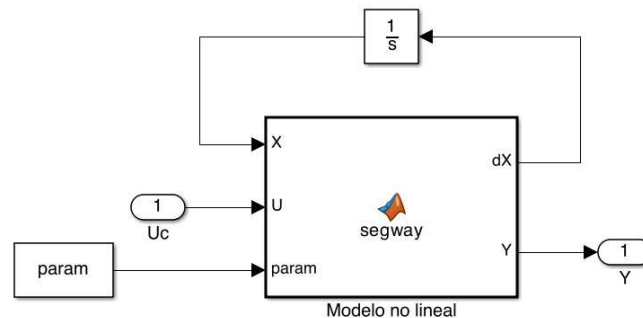


Figura 2: diagrama de bloques del modelo no lineal del *segway*

2. Diseño de un regulador PID

El objetivo de esta parte del proyecto es analizar la posibilidad de diseñar un control PID que mantenga la posición vertical del vehículo (punto de operación del sistema), aunque exista una ligera inclinación inicial o se apliquen pequeñas perturbaciones. Sólo se actuará sobre la tensión común de ambos motores, ya que este mando es el que determina la dinámica de avance y cabeceo. Se pide:

- Obtener la matriz de transferencia entre la tensión común de los motores y las tres salidas del modelo: velocidad de avance (m/s), velocidad angular de cabeceo (rad/s) y ángulo de cabeceo (rad). Aproximar la función de transferencia entre la tensión común y el ángulo de cabeceo mediante la siguiente función de transferencia, estimando los valores numéricos de los parámetros K_{th} , T_v y T_w :

$$P(s) = \frac{K_{th}s}{(1 + T_v s)(1 - T_w^2 s^2)}$$

- Utilizando parámetros genéricos (K_{th} , T_v y T_w), demostrar aplicando el criterio de Routh-Hurwitz, que no es posible estabilizar el vehículo mediante un control PD sin filtrado. No es necesario filtrar la acción diferencial porque la derivada del ángulo de cabeceo es la medida directa mediante el giróscopo de la velocidad angular de cabeceo, que ya se ha filtrado previamente.

- Demostrar mediante el criterio de Routh-Hurwitz que sí es posible diseñar un control PID en configuración paralelo y sin filtrado que equilibre teóricamente el vehículo.
- Obtener un sistema de ecuaciones que permiten diseñar un control PID sin filtrado (parámetros K , T_i y T_d) suponiendo que el polinomio deseado en lazo cerrado es $s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0$, con coeficientes a_0 , a_1 y a_2 conocidos.
- Utilizando, los valores numéricos de los parámetros de la planta, seleccionar los valores numéricos de los parámetros del control para disponer en lazo cerrado de dos polos complejos con factor de amortiguamiento igual a 0.7, pulsación natural igual a 4.5 rad/s y un tercer polo real igual a -25.
- Se suministra el fichero *SEGWAY_SIM_PID.slx* para poder simular la respuesta del vehículo equilibrista con control PID para un ángulo de cabeceo inicial. En este modelo se pueden comparar las respuestas del modelo linealizado y del modelo no lineal. Anular en el fichero *CONTROL_SEGWAY.m* el par de fricción máximo en las simulaciones de la respuesta del vehículo equilibrista con control PID para acelerar su ejecución.
- Las simulaciones consisten en la respuesta libre para una inclinación inicial en el ángulo de cabeceo con/sin par resistente y con/sin error de estimación en el ángulo de cabeceo. Para añadir la condición inicial del vector de estado, debe incluirse en el fichero de diseño las siguientes instrucciones:

```
%% Condición inicial para la simulación
% Angulo de cabeceo inicial
th0 = 10;
X0=[0 0 th0*pi/180]';
```

En el código anterior, se especifica una inclinación inicial de 10° que debe adaptarse a lo especificado en cada apartado. La denominación X0 para la condición inicial del vector de estado debe modificarse si entra en conflicto con la denominación utilizada previamente en el código para el vector de estado en el punto de operación, ya que deben ser valores diferentes.

- Comprobar mediante simulación usando el modelo no lineal suministrado (*SEGWAY_SIM_PID.slx*) que este control estabiliza el ángulo de cabeceo para un valor inicial de 5°. Comprobar la respuesta de todas las variables de estado y sus derivadas. El tiempo de simulación debe ser igual a 5 s.
- Comparar las respuestas obtenidas mediante el modelo no lineal y el modelo linealizado para diferentes valores del ángulo inicial de cabeceo.
- Determinar el ángulo inicial máximo en grados para el cual el sistema de control no puede estabilizar el vehículo usando el modelo no lineal y teniendo en cuenta una limitación del mando igual a 8.5 V.
- Para un valor inicial de 5° y usando el modelo no lineal, repetir la simulación si existe un error constante de 0.1 grados en la medida del ángulo de cabeceo. A partir de los resultados obtenidos en la velocidad y en la aceleración, discutir la validez del control PID diseñado.

3. *Diseño de un regulador por realimentación de estado*

El objetivo de esta parte del proyecto es diseñar e implantar un regulador por realimentación de estado que mantenga la posición vertical del vehículo (punto de operación del sistema), aunque exista una ligera inclinación inicial o se apliquen pequeñas perturbaciones. Sólo se actuará sobre la tensión común de ambos motores, ya que este mando es el que determina la dinámica de avance y cabeceo.

La calidad del control depende de la asignación de polos que se realice en lazo cerrado. Sin embargo, no es inmediato evaluar a priori si una determinada ubicación de los polos es mejor o no que otra. Las prestaciones de un determinado diseño dependen fundamentalmente de dos aspectos críticos: la robustez frente a posibles discrepancias entre el modelo de diseño y el sistema real y la amplificación en el mando del ruido de medida. El mejor diseño es aquél que garantice una respuesta lo más rápida posible y suficientemente amortiguada sin incrementar demasiado la sensibilidad frente a errores de modelado y la amplificación en el mando del ruido de medida. Aunque existen procedimientos matemáticos basados en el cálculo de funciones de sensibilidad, puede emplearse en este caso una simulación no lineal con ruido en la medida y ángulo de inclinación inicial creciente para evaluar dichos aspectos.

El procedimiento de diseño del regulador por realimentación de estado consiste en la especificación de los autovalores de la matriz de estado en lazo cerrado con el fin de calcular las ganancias que se deben aplicar a las variables de estado para generar el mando. Posteriormente, debe comprobarse mediante simulación la amplificación en el mando del ruido de medida y el máximo ángulo inicial de inclinación para el que puede equilibrarse el vehículo.

Todo el código de diseño del regulador por realimentación de estado se añade al fichero de Matlab *CONTROL_SEGWAY.m* que ya se empleó en la sesión previa. El regulador por realimentación de estado se diseña en tiempo discreto con período de muestreo igual a 5 ms. Los pasos que se deben seguir para completar con éxito el diseño del regulador son los siguientes:

- Discretizar (comando **c2d**) el modelo linealizado obtenido en la sesión previa (representación de estado en tiempo continuo) con período de muestreo igual a 5 ms.
- Añadir al fichero las instrucciones necesarias para diseñar el vector fila de ganancias **Kcd** del regulador. La estructura aproximada del código que se debe incluir en el fichero se muestra a continuación:

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% OBJETIVO: MANTENER EL PUNTO DE EQUILIBRIO %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% En el modelo incremental todas las variables de estado valen 0 en el
% punto de equilibrio
% Estrategia de control: U[k]=-Kcd*X[k]
% Se aplica sobre el modelo incremental en tiempo discreto
% X[k+1] = Ad*X[k] + Bd*U[k] = Ad*X[k] - Bd*Kcd*X[k] = (Ad-Bd*Kcd)*X[k]
% La matriz de estado en lazo cerrado es Ad-Bd*Kcd
% Se fijan las dinámicas en lazo cerrado para que el sistema retorne al
% punto de equilibrio de forma rápida y bien amortiguada

% Asignación de polos en lazo cerrado
% Polos de la planta en tiempo continuo
polos_la=eig(matA);
w_la=max(polos_la); % pulsación del polo inestable
% Pulsación natural y amortiguamiento de los polos dominantes en lazo
% cerrado y en tiempo continuo
wn=????*w_la;
seta=????;
% Polos dominantes en lazo cerrado y en tiempo continuo
polos_lc=wn*[-seta+sqrt(1-seta^2)*1j -seta-sqrt(1-seta^2)*1j].';
% Polos adicionales en lazo cerrado y en tiempo continuo
polos_ad=-????*wn;
% Polos en lazo cerrado y en tiempo discreto
polosd_lc=exp([polos_lc ; polos_ad]*ts);
% Cálculo de la matriz Kcd del control
Kcd=place(Adpsi,Bdpsi,polosd_lc);

```

Se han añadido caracteres ‘????’ en aquellas posiciones del código donde se debe introducir la información necesaria para realizar el diseño, básicamente la situación de los autovalores de la matriz de estado o polos del sistema en lazo cerrado.

- El diagrama de bloques de Simulink utilizado en la implantación final para estimar el vector de estado a partir de la medida de los encoders de los motores, el giróscopo y el acelerómetro se muestra en la figura 5. La estimación del ángulo de cabeceo se realiza a partir de la medida del giróscopo y del acelerómetro mediante el filtro complementario mostrado en la figura 6.

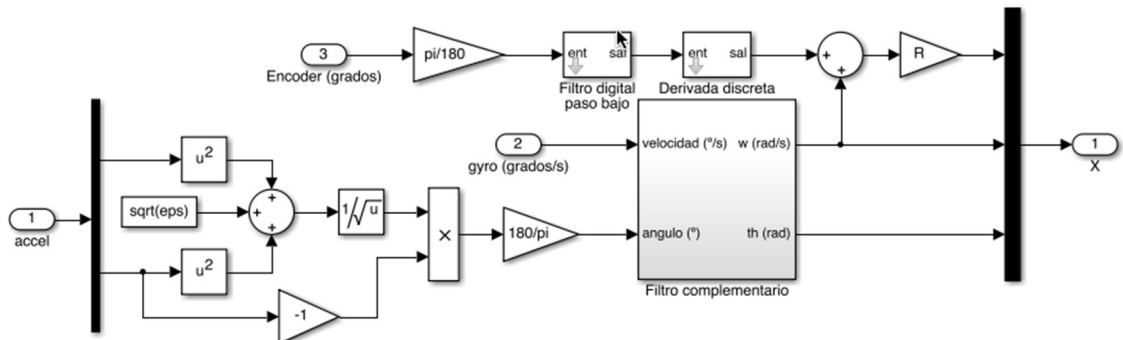


Figura 5: Estimador del vector de estado a partir de las medidas disponibles.

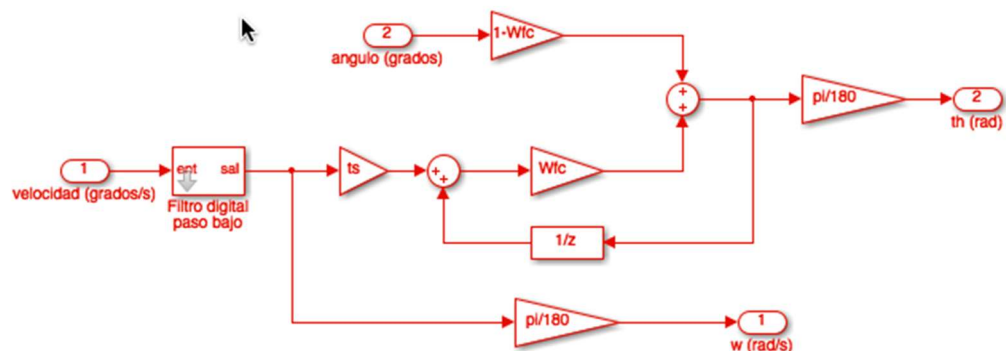


Figura 6: Diagrama de bloques del filtro complementario.

Se han añadido en la cabecera del fichero otros parámetros adicionales requeridos en la implantación del control:

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Otros parametros del control %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Instante inicial de control (ms)
time_start = 1;
% Factor de filtrado de la medida de la velocidad
alfa1=0.8;
% Factor de filtrado en la calibración del giroscopo
alfa2=0.999;
% offset inicial del giroscopo
gyro0=615;
% Peso del giroscopo en el filtro complementario
Wfc=0.98;
% Frecuencia de la señal sonora (Hz)
sound_freq = 440;
% Duracion de la señal sonora (ms)
sound_dur = 500;
```

El parámetro *alfa1* define la frecuencia de corte de los filtros digitales paso bajo utilizados en la estimación del vector de estado (ver figuras 5 y 6). El parámetro *Wfc* define el peso del giróscopo con respecto al acelerómetro en la estimación del ángulo de cabeceo a través de un filtro complementario (ver figura 6). Lógicamente, el ajuste óptimo de estos parámetros también afectará a las prestaciones del sistema de control. Los valores suministrados por defecto garantizan un buen funcionamiento para una situación apropiada de los polos en lazo cerrado. Sin embargo, se recomienda explorar otros valores para estos parámetros una vez optimizado el diseño principal (posición de los polos), aunque en ningún caso de forma simultánea con éste.

- Una vez realizado el diseño del vector **Ked** de ganancias del regulador por realimentación de estado, realizar la simulación con el modelo no lineal de la respuesta libre del sistema para verificar la calidad del control. Esta simulación incluye los sensores y el estimador de estado, con el fin de que dicha simulación sea lo más realista posible. Para ello puede emplearse el fichero *SEGWAY_SIM_SFR.slx* que contiene el diagrama de bloques del sistema mixto representado en la figura 7.
- Las simulaciones consisten en la respuesta libre para una inclinación inicial en el ángulo de cabeceo con/sin par resistente y con/sin error de estimación en el ángulo de cabeceo. La inclinación inicial puede incrementarse paulatinamente para comprobar la robustez del control diseñado.
- Compárense los resultados de simulación del regulador por realimentación de estado con los obtenidos en la sesión previa para el PID cuando se añade un error de estimación en el ángulo de cabeceo. Indíquese qué ventajas tiene este control con respecto al control PID y si es posible controlar la velocidad de traslación del vehículo usando el regulador por realimentación de estado.
- Finalmente, para implantar el control diseñado en el vehículo equilibrista se descarga mediante un cable USB el fichero *SEGWAY_RT_SFR.slx* en el dispositivo NXT. **Los ensayos sobre el vehículo deben realizarse en la versión R2015a de Matlab.** El fichero puede configurarse en modo externo si se desean monitorizar las variables más relevantes.

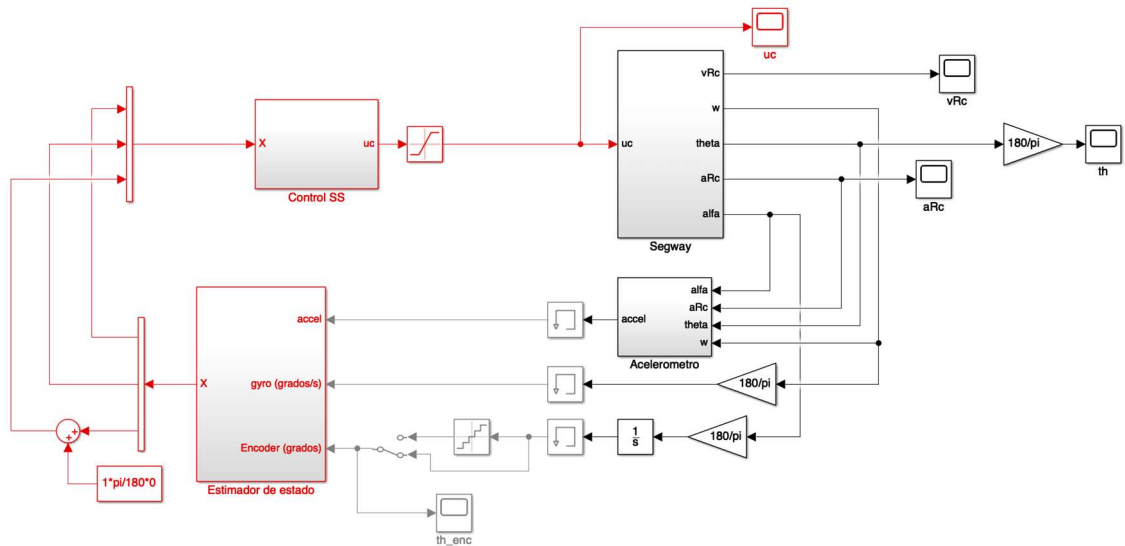


Figura 7: Modelo mixto para la simulación del sistema de control

4. Control integral de la velocidad de avance

Aunque el regulador diseñado en la sección 3 permite equilibrar el vehículo, no mantiene sin embargo la velocidad de avance en el valor deseado. Aunque se requiera velocidad nula, el regulador no lo garantiza si existen perturbaciones, como por ejemplo un error de estimación en el ángulo de cabeceo. En esta sección se diseña un control por realimentación de estado que incluye una acción integral para seguir de forma precisa el valor de referencia de la velocidad de avance. Esta estrategia de control asegura error de seguimiento nulo en régimen permanente, incluso en presencia de un error de estimación en el ángulo de cabeceo. Los pasos que se deben seguir son los siguientes:

- Añadir al fichero *CONTROL_SEGWAY.m* las instrucciones necesarias para diseñar un control integral por realimentación de estado de la velocidad del vehículo. La estructura del control puede consultarse en el modelo de simulación *SEGWAY_SIM_SFIC.slx* (ver figura 8).

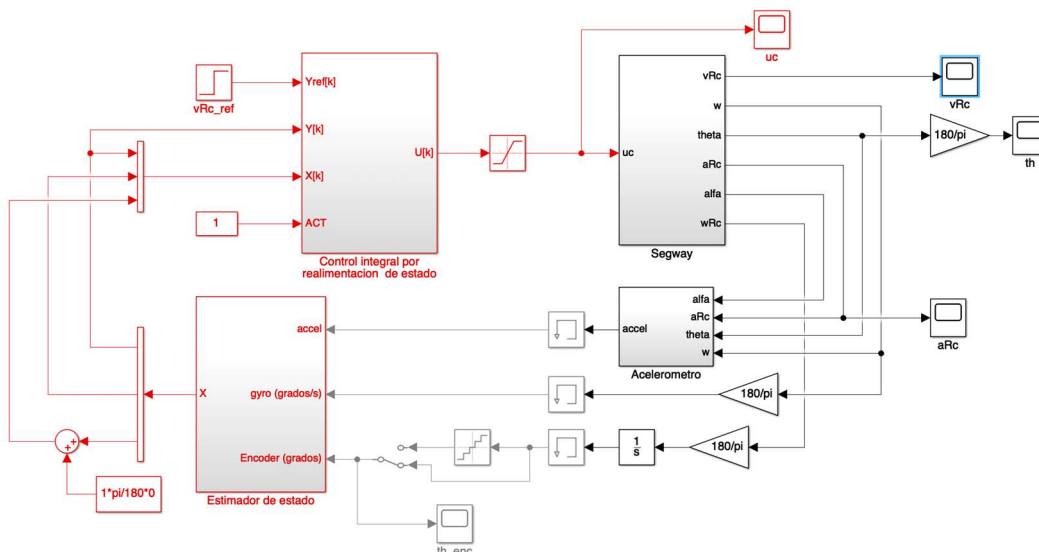


Figura 8: Modelo mixto para la simulación del sistema de control incluyendo acción integral para la velocidad de avance.

- Para diseñar las ganancias **Kcd** (vector fila de 3x1) y **Kid** (escalar) es necesario ampliar las matrices de estado y entrada para añadir la variable de estado integral. Utilizar el procedimiento descrito en la sección 6.8 del tema 6 de los apuntes de la asignatura para ampliar las matrices de estado y entrada utilizando la aproximación de la derivada en adelanto $\left(\frac{1}{s} \simeq \frac{t_s}{z-1}\right)$.
- Las únicas diferencias con respecto al caso del regulador son las siguientes:
 - Debe añadirse un cuarto polo en tiempo continuo para diseñar el control debido a la presencia de la nueva variable de estado integral.
 - La matriz de ganancias **Kad** obtenida en el diseño mediante el comando **place** debe descomponerse en dos partes:

$$\mathbf{Kcd} = \mathbf{Kad}(1:3) \quad \mathbf{Kid} = \mathbf{Kad}(4)$$
- El procedimiento de diseño del nuevo sistema de control es similar al descrito en la sección 3:
 - Modificar la situación de los autovalores de la matriz de estado en lazo cerrado o polos del sistema para calcular la matriz de ganancias **Kad** mediante el comando **acker** o **place**.
 - Realizar la simulación con el modelo no lineal del vehículo con el fin de verificar la calidad del control. Para ello puede emplearse el fichero *SEGWAY_SIM_SFIC.slx* que contiene el diagrama de bloques del sistema mixto representado en la figura 8.
 - Las simulaciones consisten en la respuesta libre para una inclinación inicial en el ángulo de cabeceo y un escalón posterior en la referencia de velocidad del vehículo. La inclinación inicial puede incrementarse paulatinamente para comprobar la robustez del control diseñado.
- Finalmente, para implantar el control en el vehículo se descarga mediante un cable USB el fichero *SEGWAY_RT_SFIC.slx* en el dispositivo NXT. **Los ensayos sobre el vehículo deben realizarse en la versión R2015a de Matlab.** El fichero puede configurarse en modo externo si se desean monitorizar las variables más relevantes.

5. Control de seguimiento de pared

El objetivo de esta parte del proyecto es diseñar e implantar un sistema de control para el seguimiento de la pared de un circuito cerrado a partir de la medida de distancia y orientación proporcionada por dos sensores EOPD (detector de proximidad electroóptico) situados en un lateral del vehículo. Se emplea como único mando la tensión diferencial aplicada a los motores.

Modelo de distancia y orientación

En la figura 9 se representa un esquema donde aparece la disposición de los sensores y las medidas d_1 y d_2 en mm proporcionadas por éstos.

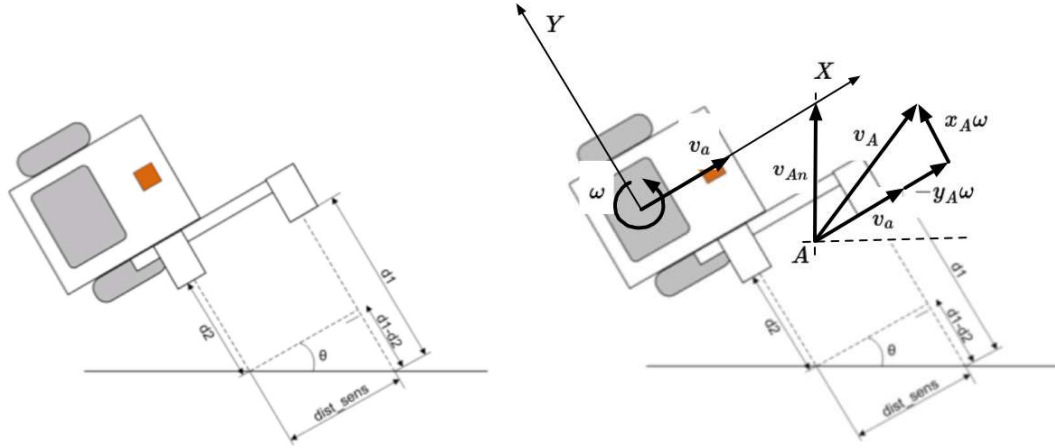


Figura 9: Disposición de los sensores y cálculo de la velocidad normal a la pared del punto medio entre sensores (punto A).

El ángulo de orientación θ se calcula como $\text{atan}\left(\frac{d_1-d_2}{\text{dist_sens}}\right)$, siendo dist_sens la distancia de separación entre los sensores en mm. La distancia d a la pared en mm se define como la proyección normal a la pared de la distancia media medida por los sensores EOPD, es decir, $d = \frac{(d_1+d_2)}{2}\cos(\theta)$. Si se define el punto A como el punto medio entre los sensores EOPD, la distancia d es la distancia mínima del punto A a la pared del circuito.

Nótese que esta distancia d se puede calcular como la integral de la componente normal a la pared de la velocidad del punto A, obtenida como si este punto perteneciese al vehículo. Si llamamos v_a a la velocidad de avance en m/s, ω a la velocidad angular de rotación en rad/s y x_A e y_A son las coordenadas del punto A en el sistema de referencia XY solidario al vehículo y origen en el punto medio del eje que conecta las ruedas, las componentes de la velocidad del punto A en los ejes X e Y resultan:

- Velocidad en eje X: $v_{Ax} = v_a - y_A\omega$.
- Velocidad en eje Y: $v_{Ay} = x_A\omega$.

Teniendo en cuenta lo anterior, la componente normal a la pared de la velocidad del punto A se calcula como $v_{An} = v_{Ax}\sin(\theta) + v_{Ay}\cos(\theta)$. La distancia d del punto A a la pared se puede determinar integrando la velocidad anterior: $d(t) = d(0) + \int v_{An}(t)dt$.

Por otra parte, existe una ecuación diferencial de primer orden que relaciona la tensión diferencial de mando u_d con la velocidad angular del vehículo ω en rad/s:

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{1}{\tau_{m_\omega}}\omega + \frac{K_{m_\omega}}{\tau_{m_\omega}}u_d$$

siendo K_{m_ω} la ganancia estática y τ_{m_ω} la constante de tiempo de la función de transferencia de primer orden que existe entre ambas variables.

El cálculo de la velocidad v_{An} es la única no linealidad en el modelo porque incluye dos funciones trigonométricas y el producto de dos señales. Las representaciones de estado no lineal y linealizada de la planta resultan:

MODELO NO LINEAL	MODELO LINEALIZADO
$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{1}{\tau_{m\omega}}\omega + \frac{K_{m\omega}}{\tau_{m\omega}}u_d$ $\frac{d\theta}{dt} = \omega - \omega_{pared}$ $\frac{dd}{dt} = 1000(v_a - \omega y_A)\sin(\theta) + 1000\omega x_A\cos(\theta)$ <p>La 'velocidad de rotación de la pared' es una perturbación consistente en un pulso:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Duración del pulso: $T_p = \frac{\pi r_{curva}}{v_a}$ ○ Amplitud del pulso: $\omega_{pared} = \frac{\pi}{T_p} = \frac{v_a}{r_{curva}}$ en rad/s 	<p>Modelo linealizado para $u_d = 0$, $\omega = 0$, $\theta = 0$, $v_a = v_{a0}$ (m/s) y $d = d_0$ (mm).</p> $\frac{d\Delta\omega}{dt} = -\frac{1}{\tau_{m\omega}}\Delta\omega + \frac{K_{m\omega}}{\tau_{m\omega}}\Delta u_d$ $\frac{d\Delta\theta}{dt} = \Delta\omega - \Delta\omega_{pared}$ $\frac{d\Delta d}{dt} = 1000x_A\Delta\omega + 1000v_{a0}\Delta\theta$ <p>Para el diseño del control, se supondrá que $x_A = 0$, evaluando a posteriori el efecto de que tuviera un valor distinto de 0.</p>

Se empleará un regulador por realimentación de estado para mantener la distancia a la pared. El modelo de giro tiene tres variables de estado: la velocidad angular de rotación (rad/s), el ángulo de orientación con respecto a la pared (rad) y la distancia a la pared (mm). A partir del modelo linealizado, se puede diseñar el regulador por realimentación de estado usando el procedimiento habitual.

Los pasos a seguir para el diseño del sistema de control de seguimiento de la pared del circuito se describen a continuación:

- Estimar los parámetros $K_{m\omega}$ y $\tau_{m\omega}$ mediante un ensayo en lazo abierto con velocidad de avance constante y una secuencia de escalones en el mando de giro. Todos los ficheros necesarios para realizar la identificación se incluyen en la carpeta *IDENT_GIRO*.
 - Para realizar el ensayo necesario para identificar el modelo de giro, se emplea el fichero **ID_SEGWAY_TR.slx** (ver figura 10) que debe cargarse en el vehículo en modo externo (**Matlab 2015a**). En este fichero de Simulink se aplica una velocidad de avance constante de 0.15 m/s y una onda cuadrada en u_d de amplitud 2 y período 1 s. Además, debe emplearse el control integral por realimentación de estado diseñado en la sesión anterior.
 - Se ejecuta el fichero y se registra u_d y ω en rad/s
 - Se preparan los datos con el fichero **prep_datos_omega.m**.
 - Se identifica el modelo ejecutando el fichero **ajuste_omega.m**.
 - Previamente, debe abrirse el fichero **sistema_omega.mdl** (ver figura 11) que contiene el modelo.
 - Este modelo incluye el filtro de primer orden que se ha aplicado a la medida de los encoders.
 - Los parámetros del modelo son:
 - $th(1) = K_{m\omega}$.
 - $th(2) = \tau_{m\omega}$.
 - $th(3)$ = tensión equivalente de offset para modelar la asimetría de los motores.

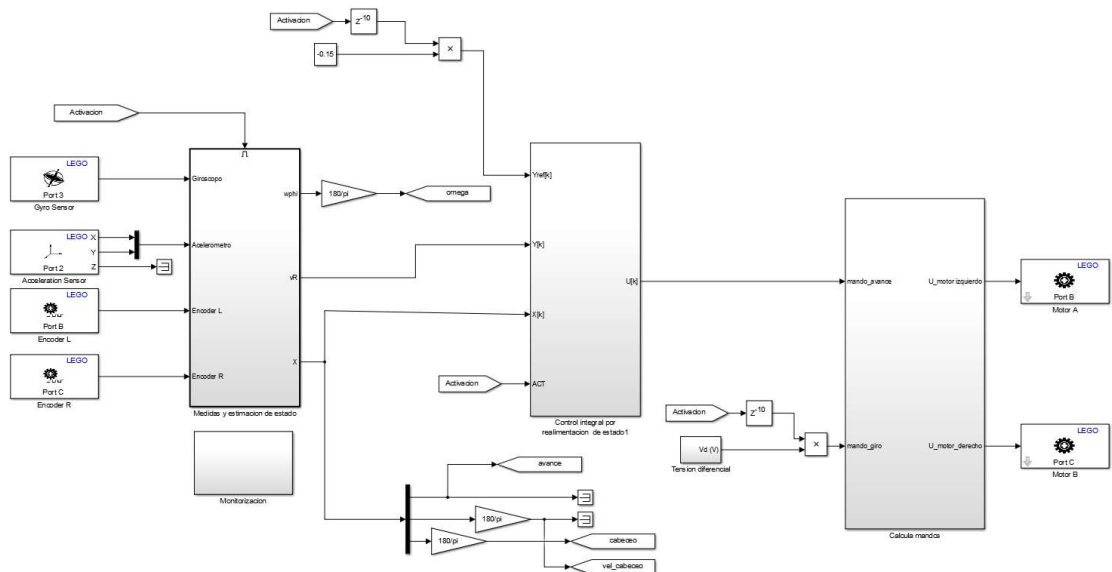


Figura 10: diagrama de bloques del modelo utilizado para ensayar el vehículo con el fin de identificar el modelo de giro

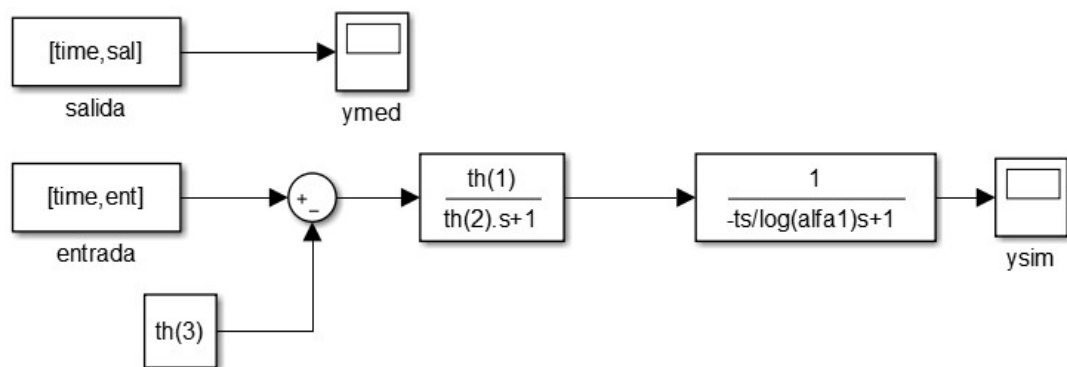


Figura 11: diagrama de bloques del modelo utilizado para identificar el modelo de giro

- Diseñar el regulador por realimentación de estado añadiendo las instrucciones necesarias al fichero *CONTROL_SEGWAY.m*. En este fichero deben incluirse todos los parámetros correspondientes al modelo de giro. Estos parámetros se emplean en el modelo de simulación del control de seguimiento de pared.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%  PARÁMETROS SEGUIMIENTO PARED  %%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Ganancia estática giro (rad/s/V)
Km_w=****;
% Constante de tiempo giro (s)
Tm_w=****;
% Abcisa punto A (m)
xA=0;
% Ordenada punto A (m)
yA=-0.09;
% Vector de parámetros
param_pared=[Km_w Tm_w xA yA];
% Distancia pared en el punto de operación (mm)
d0 = 100;
% Velocidad de avance en el punto de operación (m/s)
va0 = 0.15;
% Modelo linealizado seguimiento pared
matAp = [-1/Tm_w 0 0 ; 1 0 0 ; 1000*xA 1000*va0 0];
matBp = [ Km_w/Tm_w 0 0 ; 0 -1 0 ; 0 0 0];

```

```
matCp = eye(3);
matDp = zeros(3,3);
```

- Puede explorar la conveniencia de fijar un solo polo dominante, dos o tres (configuración de Butterworth). Debe también vigilarse la tensión diferencial aplicada a los motores para verificar que está dentro del rango admisible.
- Comprobar mediante el fichero de simulación *PARED_SIM_SFR.slx* las prestaciones del control diseñado y mejorar iterativamente dicho diseño hasta que resulte satisfactorio. Dicho modelo incluye simultáneamente la simulación con el modelo no lineal y con el modelo linealizado.

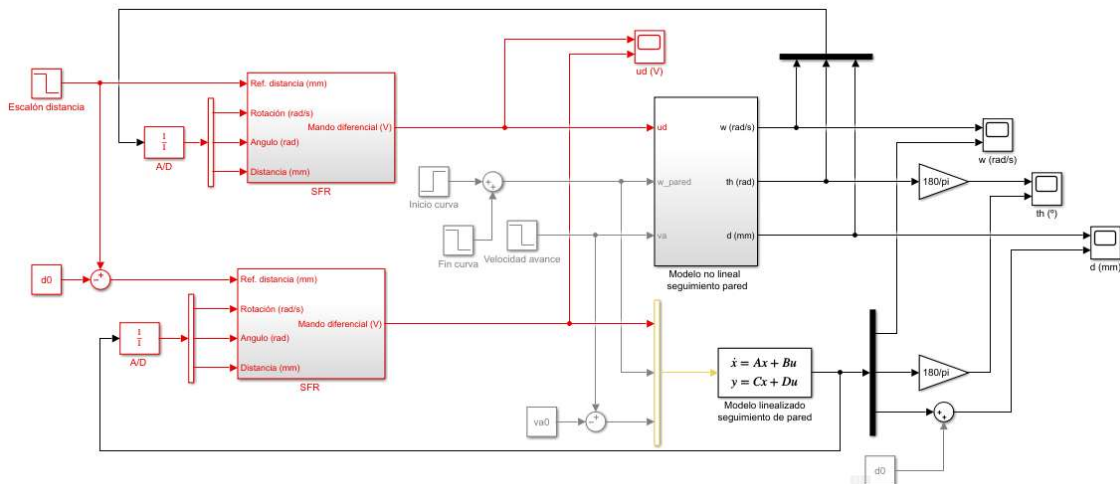


Figura 12: modelo utilizado para simular el sistema de control

- Calibrar los sensores EOPD mediante la hoja milimetrada disponible. Los valores medidos durante el proceso de calibración deben introducirse en la máscara del bloque *Calibración* dentro del subsistema *Medidas distancia y ángulo* incluido en el fichero *PARED_RT_SFR.slx* de la estrategia de control a implantar. Además, debe definirse la distancia correcta en mm entre los dos sensores EOPD dentro del bloque *Medida ángulo*.
- Finalmente, para implantar el control diseñado en el *segway* se descarga mediante un cable USB el fichero *PARED_RT_SFR.slx* (**Matlab 2015a**) en el dispositivo NXT. El fichero puede configurarse en modo externo si se desean monitorizar las variables más relevantes o modificar la referencia de velocidad de avance durante el ensayo, aunque dicho modo se encuentra desactivado por defecto.

6. Competición

- La competición consiste en una contrarreloj en un circuito cerrado. El tiempo invertido en completar el circuito se visualiza en la pantalla del dispositivo NXT en ms.
- Cada equipo puede seleccionar libremente las referencias de velocidad y distancia a la pared en cada uno de los sectores del circuito. Sin embargo, no está disponible la señal de detección del sector porque no hay puertos libres en el NXT.