

# *Proyecto 1 – Control de navegación para un vehículo con tracción diferencial*

## Contenido

<b>1. Descripción de la planta y del sistema de control .....</b>	<b>2</b>
<b>2. Objetivos y organización del proyecto .....</b>	<b>7</b>
<i>Objetivos del proyecto .....</i>	<i>7</i>
<i>Organización del proyecto .....</i>	<i>7</i>
<b>3. Sesión 1: Modelado .....</b>	<b>8</b>
<b>4. Sesión 2: Predictor de Smith.....</b>	<b>12</b>
<b>5. Sesión 3: Control en cascada .....</b>	<b>17</b>
<b>6. Sesión 4: Regulador por realimentación de estado.....</b>	<b>25</b>
<b>7. Sesión 5: Control adaptativo .....</b>	<b>33</b>
<b>8. Sesión 6: Competición .....</b>	<b>41</b>

## 1. Descripción de la planta y del sistema de control

El objetivo de este proyecto es diseñar el sistema de control de navegación del vehículo con tracción diferencial mostrado en la figura 1. La navegación puede realizarse de tres modos diferentes:

- *Navegación libre*: se controlan las velocidades de avance y giro para seguir las referencias suministradas localmente, desde un ordenador o desde una emisora de radiofrecuencia.
- *Navegación para seguimiento de trayectorias*: se controla la velocidad de avance y el ángulo de guiñada para seguir una trayectoria previamente planificada mediante una secuencia de puntos intermedios o *waypoints*. En este caso se requiere localizar el vehículo en el entorno de trabajo mediante un sistema de cámaras infrarrojas externas (sistema de localización *Optitrack*) y marcadores situados en el vehículo.
- *Navegación mediante seguimiento de pared*: en este caso se controla la distancia y el ángulo de orientación del vehículo con respecto a la pared en un circuito cerrado con el fin de que el vehículo pueda completar dicho circuito.

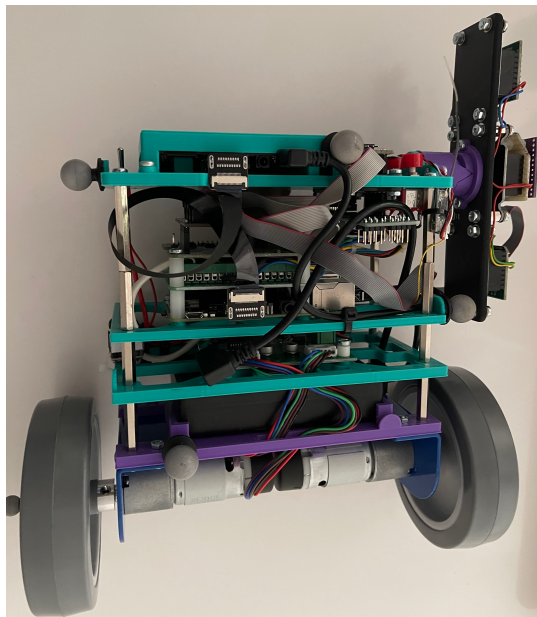


Figura 1: Vehículo con tracción diferencial empleado en el laboratorio

El vehículo dispone de tracción diferencial mediante dos motores DC (EMG30) que accionan las dos ruedas y un punto de apoyo esférico en la parte delantera. Además, cada motor consta de un *encoder* magnético para medir el ángulo girado.

Un miniordenador Raspberry Pi 3B+ adquiere las medidas de todos los sensores (IMU, *encoders* magnéticos de los motores y sensores laterales de distancia a la pared), monitoriza el estado de 3 pulsadores para controlar el estado del vehículo, envía las ordenes PWM al *driver* MD25 de los motores DC y señala el estado del vehículo mediante un led RGB. Además, recibe la información de la posición y orientación del vehículo (comunicación inalámbrica por *bluetooth*) desde el ordenador conectado al sistema de cámaras Optitrack, recibe los canales de una emisora RC y gestiona la comunicación con un programa de monitorización en el PC.

El vehículo consta de una batería que proporciona una tensión no regulada de 12 V para alimentar los motores y una tensión regulada de 5 V para la alimentación de la electrónica. Se recomienda cargar la batería cuando su tensión monitorizada es inferior a 10.5 V.

El sistema de control determina la tensión que se debe aplicar a cada motor (izquierdo y derecho) para conseguir el valor deseado para el avance y el giro del vehículo. La tensión común  $u_c = \frac{u_l + u_r}{2}$  aplicada a ambos motores ( $u_l$  para el motor izquierdo y  $u_r$  para el derecho) define la velocidad de avance del vehículo, mientras que la velocidad de giro viene determinada por la componente diferencial de tensión  $u_d = \frac{u_l - u_r}{2}$ . Por lo tanto, se cumple que las tensiones aplicadas a los motores son  $u_l = u_c + u_d$  y  $u_r = u_c - u_d$ .

Todos los controles que se diseñarán e implantarán son digitales con un período de muestreo igual a 10 ms.

### **Modelo de navegación libre o para seguimiento de trayectoria**

Las velocidades de avance y giro del vehículo pueden calcularse a partir de la medida de la posición angular de los motores (*encoders* magnéticos) empleando la siguiente estrategia:

- La posición angular de cada rueda se registra con un período de muestreo igual al período de control (10 ms).
- La velocidad de avance de cada rueda ( $v_l$  para la rueda izquierda y  $v_r$  para la derecha) se calcula por diferencias finitas: resta de dos medidas consecutivas de la posición angular del motor dividida por el período de muestreo, multiplicada por el radio de la rueda y dividida por la relación de engranajes conjunta del motor y de la rueda. Esta relación es 30:1 para los motores EMG30 empleados en el vehículo.
- Se filtra el cálculo de ambas velocidades mediante un filtro paso bajo de primer orden de constante de tiempo igual a  $T_f$ .
- La velocidad de avance del vehículo es la media de las velocidades de avance de ambas ruedas  $v = \frac{v_l + v_r}{2}$ .
- La velocidad de giro del vehículo es la diferencia entre las velocidades de avance de cada rueda dividida por la separación  $W$  entre las ruedas  $\omega = \frac{v_l - v_r}{W}$ .

La aplicación del filtrado está motivada por la resolución finita en la medida de la posición que suministra el *encoder* magnético. La resolución finita introduce un ruido de cuantización que se amplificará en el mando PWM de los motores cuando se aplica acción diferencial. Para atenuar dicho ruido se aplica a la medida del encoder el filtro paso bajo de primer orden mencionado. En la figura 2 se observa su efecto sobre la medida de las velocidades de avance y giro.

Nótese que, dependiendo del filtro aplicado, puede existir una discrepancia evidente entre las velocidades reales medidas por el *encoder* y las medidas filtradas, y que las variables que se controlarán son estas últimas. La discrepancia es mayor cuanto mayor es la constante de tiempo  $T_f$  del filtro. Esto significa que los transitorios reales en el vehículo serán más enérgicos que los obtenidos teóricamente y visualizados en los registros. Este problema se resuelve en una aplicación práctica filtrando la referencia con el mismo filtro paso bajo aplicado a la medida, aunque en este proyecto no se aplicará esa solución para que las conclusiones obtenidas a partir de los registros sean más claras.

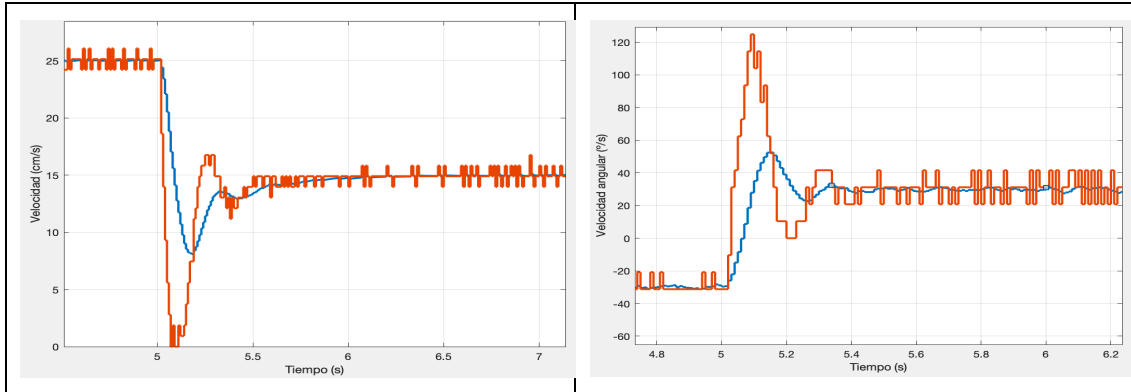


Figura 2: Velocidades de avance y de giro medidas mediante el *encoder* magnético (trazo rojo) y filtradas (trazo azul)

La estructura de la función de transferencia de la planta entre la tensión común  $u_c$  de los motores y la velocidad de avance  $v$  o entre la tensión diferencial  $u_d$  de los motores y la velocidad de giro  $\omega$ , incluyendo el filtro de primer orden, es idéntica en ambos casos:

$$P(s) = \frac{K_m}{(1 + T_m s)(1 + T_f s)} e^{-\rho s}$$

Donde  $K_m$  es la ganancia estática,  $T_m$  es la constante de tiempo del vehículo,  $T_f$  es la constante de tiempo del filtro y  $\rho$  es un retardo introducido intencionadamente en la aplicación del mando y que está en torno a 50 ms. Los parámetros  $K_m$  y  $T_m$  son distintos para las dinámicas de avance y giro y se estimarán mediante ensayos. La constante de tiempo del filtro  $T_f$  y el retardo  $\rho$  son parámetros de valor conocido e idéntico en ambas funciones de transferencia.

La velocidad de avance puede estimarse también integrando la aceleración proporcionada por el acelerómetro de tres ejes presente en la IMU (*Inertial Measurement Unit*). De la misma forma, la velocidad de giro puede medirse usando el giróscopo de tres ejes que contiene la IMU. Las medidas de la IMU cuentan también con un filtrado adicional paso bajo de primer orden similar al utilizado en el *encoder*. Además, estas medidas adicionales pueden complementarse con las proporcionadas por el *encoder* para mejorar la precisión mediante un EKF (*Extended Kalman Filter*). Si este filtro se diseña adecuadamente, se puede reducir considerablemente la constante de tiempo  $T_f$  equivalente del filtro.

En el caso de que se desee seguir una trayectoria previamente planificada, es necesario controlar el ángulo de guiñada en vez de la velocidad de giro. En este caso, el modelo entre la tensión diferencial y el ángulo de guiñada es similar al correspondiente a la velocidad de giro, pero se añade un integrador a la función de transferencia de la planta. El ángulo de guiñada debe determinarse mediante un sistema de posicionamiento externo, por ejemplo, el sistema de cámaras infrarrojas *Optitrack* disponible en el laboratorio.

### **Modelo de navegación mediante seguimiento de pared**

El vehículo consta de dos sensores laterales VL6180X ToF (*Time of Flight*) que miden las distancias a la pared de un circuito. En la figura 3 se representa la disposición de los sensores en el vehículo y las medidas  $d_1$  y  $d_2$  proporcionadas por éstos. El ángulo de orientación con respecto a la pared se calcula como  $\alpha = \text{atan}\left(\frac{d_2 - d_1}{d_s}\right)$ , siendo  $d_s$  la

distancia de separación entre los sensores. La distancia  $d_n$  a la pared se define como la proyección normal a la pared de la distancia media medida por los sensores, es decir,  $d_n = \frac{(d_1 + d_2)}{2} \cos(\alpha)$ . Si se define el punto  $A$  como el punto medio entre los sensores, la distancia  $d_n$  es la distancia mínima del punto  $A$  a la pared del circuito.

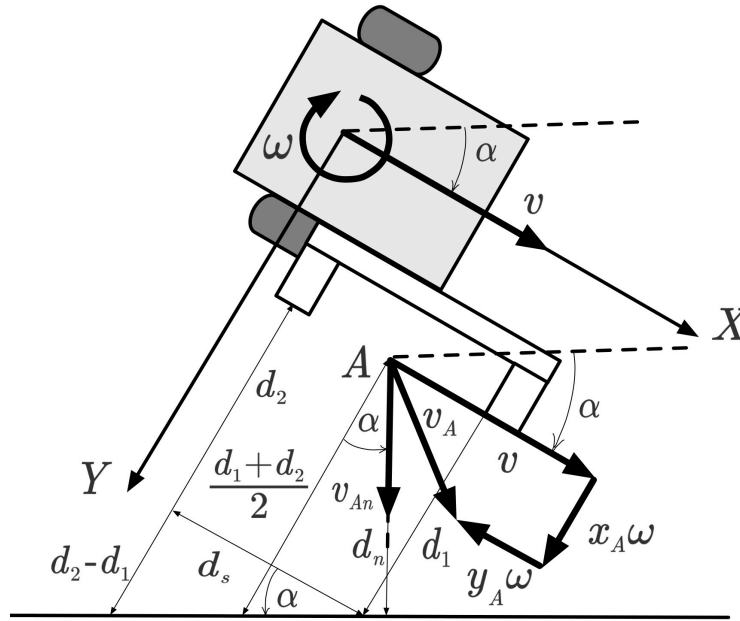


Figura 3: Disposición de los sensores ToF y cálculo de la distancia mínima a la pared del punto medio entre los sensores (punto  $A$ ).

Nótese que esta distancia  $d_n$  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 la velocidad de avance del punto medio entre las ruedas,  $\omega$  a la velocidad angular de rotación 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  $A$  resultan:

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

Nótese que las velocidades de avance y giro que intervienen en este modelo son las reales y no las filtradas.

Teniendo en cuenta las ecuaciones anteriores, la componente normal a la pared de la velocidad del punto  $A$  se calcula como  $v_{An} = v_{Ax} \sin(\alpha) + v_{Ay} \cos(\alpha)$ . La distancia mínima  $d_n$  del punto  $A$  a la pared se puede determinar restando a la posición inicial la integral de la componente normal a la pared de la velocidad del punto  $A$ :  $d_n(t) = d_n(0) - \int_0^t v_{An}(t) dt$ .

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  $\omega$  en rad/s:

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{1}{T_m}\omega + \frac{K_m}{T_m}u_d$$

siendo  $K_m$  la ganancia estática y  $T_m$  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
$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{1}{T_m}\omega + \frac{K_m}{T_m}u_d$ $\frac{d\alpha}{dt} = \omega - \omega_{pared}$ $\frac{dd_n}{dt} = -(v - \omega y_A)\sin(\alpha) - \omega x_A \cos(\alpha)$ <p>La 'velocidad de rotación de la pared' es una perturbación consistente en un pulso:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Duración del pulso: <math>T_p = \frac{\pi r_{curva}}{v}</math></li> <li>Amplitud del pulso: <math>\omega_{pared} = \frac{\pi}{T_p} = \frac{v}{r_{curva}}</math> en rad/s</li> </ul>	<p>Modelo linealizado para <math>u_d = 0</math>, <math>\omega = 0</math>, <math>\alpha = 0</math>, <math>v = v_o</math> y <math>d_n = d_o</math>.</p> $\frac{d\Delta\omega}{dt} = -\frac{1}{T_m}\Delta\omega + \frac{K_m}{T_m}\Delta u_d$ $\frac{d\Delta\alpha}{dt} = \Delta\omega - \Delta\omega_{pared}$ $\frac{d\Delta d_n}{dt} = -x_A\Delta\omega - v_o\Delta\alpha$ $\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\alpha \\ \Delta d_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_m} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ -x_A & -v_o & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\alpha \\ \Delta d_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{K_m}{T_m} & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_d \\ \Delta\omega_{pared} \end{bmatrix}$

Por último, la función de transferencia  $P(s)$  entre la componente diferencial de la tensión de los motores  $u_d$  y la distancia a la pared  $d_n$  puede definirse como el producto de dos funciones de transferencia: la función de transferencia  $P_1(s)$  entre  $u_d$  y  $\alpha$  y la función de transferencia  $P_2(s)$  entre  $\alpha$  y  $d_n$ .

$$P(s) = \frac{\overbrace{P_1(s)}^{K_m}}{(1 + T_m s)s} \times \frac{\overbrace{P_2(s)}^{-v_o \left(1 + \frac{x_A}{v_o} s\right)}}{s} = \frac{-v_o K_m \left(1 + \frac{x_A}{v_o} s\right)}{(1 + T_m s)s^2}$$

Nótese que la función de transferencia de esta planta tiene un doble integrador, lo cual dificulta la aplicación de un control PID, aunque la presencia de un cero negativo ( $x_A > 0$ ) mitiga en parte este problema. Sin embargo, si cambia el signo de la velocidad de avance  $v_o$ , aparece un cero positivo que complica aún más el problema de control. Además, la ganancia estática y la constante de tiempo del cero dependen de la velocidad de avance, por lo que el sistema linealizado puede ser variable en el tiempo si cambia dicha velocidad.

## 2. Objetivos y organización del proyecto

### *Objetivos del proyecto*

Después de realizar este proyecto, el alumno debe estar capacitado para:

- Identificar la función de transferencia de una planta a partir de ensayos con el fin de diseñar su sistema de control.
- Diseñar un control PID que incorpore un predictor de Smith para compensar cualquier retardo significativo presente en la planta.
- Diseñar un control PID en cascada cuando hay una variable intermedia disponible y entender las ventajas de esta solución en presencia de ciertas dinámicas conflictivas.
- Diseñar un regulador por realimentación de estado mediante asignación de polos o LQR y comprender las ventajas que este tipo de control conlleva en ciertas aplicaciones, así como sus limitaciones.
- Comprender las ventajas e inconvenientes de un estimador de estado para la fusión de información procedente del modelo y de sensores imperfectos con el fin de mejorar las prestaciones del sistema de control.
- Diseñar un control adaptativo en sus diferentes variantes e identificar la conveniencia o no de aplicar cada una de esas variantes en diferentes problemas de control.

### *Organización del proyecto*

Este proyecto está organizado en las siguientes 6 sesiones:

- **Sesión 1: Modelado.** En esta sesión se estimarán todos los parámetros del modelo detallado de simulación y que determinan las funciones de transferencia entre la tensión común aplicada a los motores y la velocidad de avance del vehículo y entre la tensión diferencial de los motores y la velocidad de rotación del vehículo. Estas funciones de transferencia nos permitirán diseñar distintos controles durante las diferentes sesiones del proyecto.
- **Sesión 2: Predictor de Smith.** En esta sesión se diseñará un control PID de velocidad de avance en presencia de un retardo significativo y se compensará su efecto mediante un predictor de Smith.
- **Sesión 3: Control en cascada.** Durante esta sesión se diseñarán controles PID de un solo lazo y en cascada para el seguimiento de la pared del circuito con velocidad de avance constante.
- **Sesión 4: Control por realimentación de estado.** Durante esta sesión se diseñarán reguladores por realimentación de estado mediante asignación de polos y LQR para el seguimiento de la pared del circuito con velocidad de avance constante. Además, se analizará la conveniencia de añadir un estimador de estado EKF (*Extended Kalman Filter*).
- **Sesión 5: Control adaptativo.** En esta sesión se diseñarán dos controles adaptativos: un control PID tipo *Gain Scheduling* para el seguimiento de pared con cambios en la



velocidad de avance, y un control STR (Self-Tuning Regulator) de la velocidad de avance para compensar cambios en la constante de tiempo del filtro.

- **Sesión 6: Competición.** Se realizará una competición en la que se evaluará qué grupo ha diseñado el mejor control para navegación mediante seguimiento de pared. El objetivo es completar el circuito en el menor tiempo posible con una limitación en la velocidad de avance.

### 3. Sesión 1: Modelado

El objetivo de esta primera sesión, además de familiarizarnos con el uso del vehículo, es estimar mediante ensayos los parámetros del modelo detallado del vehículo y determinar las funciones de transferencia entre la tensión común  $u_c$  aplicada a los motores y la velocidad de avance  $v$  del vehículo y entre la tensión diferencial  $u_d$  de los motores y la velocidad de rotación  $\omega$  del vehículo. Las dos funciones de transferencia tienen la misma estructura:

$$P(s) = \frac{K_m}{(1 + T_m s)(1 + T_f s)}$$

Se desean determinar los valores de  $K_m$  y  $T_m$ . La constante de tiempo del filtro de primer orden  $T_f$  se supone conocida. En el proceso de identificación se estiman todos los parámetros de los motores (el par de fricción estático, la resistencia eléctrica y las constantes de par y de fuerza contraelectromotriz), los parámetros mecánicos del vehículo (momento de inercia y fricciones viscosas) y la caída de tensión del convertidor PWM que alimenta cada motor. Estos parámetros del modelo detallado no se requieren para el diseño de los controles, pero sí para el simulador del vehículo.

#### ***Trabajo previo***

Antes de la primera sesión de este proyecto, deben leerse los puntos 1 y 2 de este documento y la “Guía de usuario del coche”. Llevar impresos ambos documentos al laboratorio.

#### ***Trabajo de laboratorio***

##### **Pasos previos**

Encender el vehículo y conectarlo al PC e instalar el firmware (sólo si lo indica el profesor) siguiendo los pasos descritos en la “Guía de usuario del coche”.

##### **Configuración del ensayo para identificar el modelo de velocidad de avance**

1. Abrir /SOFTWARE\_COMPONENTS / CONTROL / CONFIG\_CONTROL.m, acceder a la sección REFERENCE DEFINITION y seleccionar los siguientes valores para definir las señales de referencia: una onda cuadrada para la velocidad de avance y 0 para la velocidad de giro:

```
%-----
%% REFERENCE DEFINITION
%-----
% FORWARD VELOCITY REFERENCE TYPE
% / 0. CONSTANT / 1. PULSE / 2. SQUARE / 3. PRBS / 4. RAMP
CONTROL.STATE.FV_TARGET_TYPE = uint8(2);
%-----
```



```

% YAW RATE REFERENCE TYPE
% / 0. NONE / 1. PULSE / 2. SQUARE / 3. PRBS
CONTROL.STATE.YR_TARGET_TYPE = uint8(0);
%-----
  
```

Salvar el fichero .m (pero no ejecutar).

- La onda cuadrada que se aplica en la referencia de la velocidad de avance durante el ensayo (definida por defecto) cambia entre 0.25 y 0.4 m/s con período igual a 5 s.
- Ejecutar el fichero **/CONFIGURATION / CONFIG\_CAR.m**, definiendo previamente `RUN_MODE = 4` e `IDENT_TEST = true`. Esta última opción aplica un control  $\bar{P}$  con ganancia predefinida tanto para la velocidad de avance como para la velocidad de giro. Durante la ejecución se abrirá automáticamente el fichero de Simulink **PC\_CONTROL\_STATION.slx**.
- Una vez abierto el fichero **PC\_CONTROL\_STATION.slx**, acceder al subsistema **/MONITORING / PC: SCOPES** (ver figura 4) para visualizar y registrar las variables de interés. Si no está abierto, abrir el osciloscopio `SCOPE_PC`.

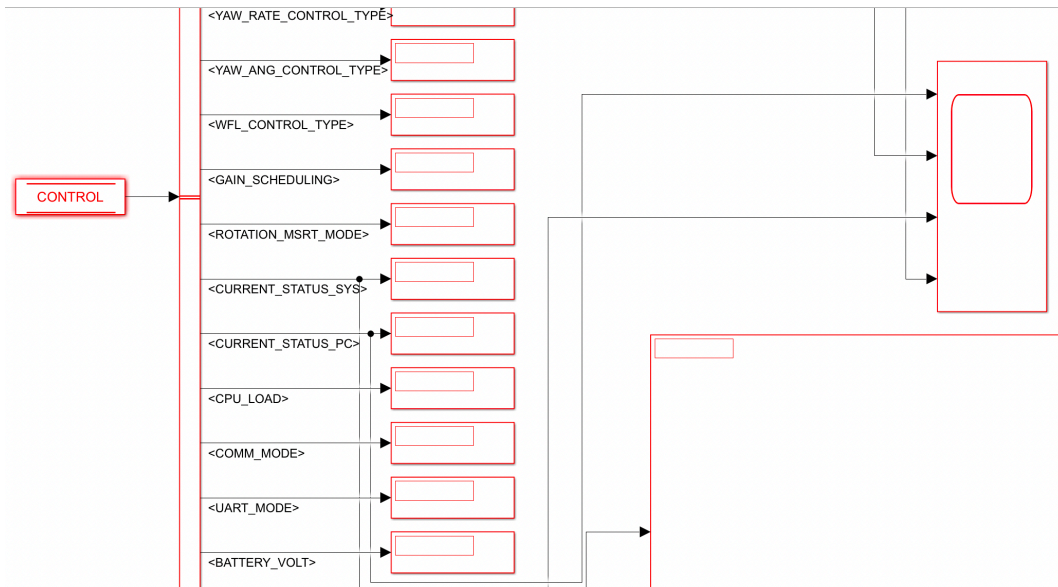


Figura 4: Subsistema de monitorización durante los ensayos

### **Realización del ensayo para identificar el modelo de velocidad de avance**

Siguiendo las instrucciones incluidas la “Guía de usuario del coche”, poner en marcha el vehículo, registrar las variables de interés y, una vez concluido el ensayo, representarlas gráficamente y guardarlas en un fichero .mat. El control  $\bar{P}$  aplicado a la velocidad de giro es muy suave, por lo que es muy probable que el vehículo no avance en línea recta y se desvíe hacia uno de los lados.

### **Identificación del modelo de velocidad de avance**

- A partir de este ensayo, se van a estimar los parámetros del modelo detallado que afectan exclusivamente al avance del vehículo mediante un ajuste por mínimos cuadrados. La entrada es la referencia de la velocidad de avance y la salida es la velocidad de avance medida y filtrada. Los parámetros estimados de los motores son el par de fricción estático, la resistencia eléctrica, las constantes de par y de fuerza contraelectromotriz, la inercia y la fricción viscosa.

2. En el fichero /CONFIGURATION / CONFIG\_CAR.m, definir RUN\_MODE = 2. Salvar, **pero no ejecutar**.
3. En la sección FIT MODE del fichero /SOFTWARE\_COMPONENTS / MODEL / MODEL\_IDENT.m, definir FIT\_MODE = 6. De esta manera, se usarán los datos de velocidad de avance en la identificación del modelo. **Importante:** hay que cargar el fichero .mat que los contiene si no estuvieran ya cargados en memoria.
4. Ejecutar el fichero MODEL\_IDENT.m para estimar los parámetros óptimos del modelo. Durante la identificación, se representa en un mismo gráfico y en cada iteración la respuesta real, la obtenida con el modelo y la diferencia entre ambas. La ejecución termina automáticamente en un máximo de 10 iteraciones. La ejecución puede detenerse únicamente pulsando el botón de STOP en el osciloscopio contenido en el bloque TEST: SCOPES, dentro del subsistema /MONITORING en el fichero CAR\_CONTROL\_SYSTEM.slx. Dicho osciloscopio debe aparecer automáticamente en pantalla cuando el fichero CAR\_CONTROL\_SYSTEM.slx.
5. Una vez terminado el proceso de identificación, copiar el texto en pantalla donde se definen todos los parámetros y sustituir dicho texto en la sección “ESTIMATED PARAMETERS...” del fichero /SOFTWARE\_COMPONENTS / MODEL / CONFIG\_MODEL.m y salvar el fichero. De esta forma, se sustituyen los valores definidos por defecto para los parámetros del modelo por los estimados a partir del ensayo. Guardar también la gráfica generada en la última iteración en una figura de Matlab.
6. Copiar la función de transferencia identificada para el modelo de velocidad de avance ejecutando CONFIG\_CAR.m y mirando la variable FORWARD\_VEL\_TF (formato tf) y la variable FORWARD\_VEL\_ZPK (formato TimeConstant).

### Configuración del ensayo para identificar el modelo de velocidad de giro

1. A continuación, hay que repetir todo el proceso para estimar aquellos parámetros del modelo detallado que determinan la función de transferencia entre la tensión diferencial  $u_d$  de los motores y la velocidad de rotación  $\omega$  del vehículo. Abrir /SOFTWARE\_COMPONENTS / CONTROL / CONFIG\_CONTROL.m, acceder a la sección REFERENCE DEFINITION y modificar los siguientes valores en la configuración del sistema de control para aplicar las nuevas referencias de velocidad (velocidad de avance constante y onda cuadrada en la referencia de la velocidad de giro):

```
%-----
%% REFERENCE DEFINITION
%-----
% FORWARD VELOCITY REFERENCE TYPE
% / 0. CONSTANT / 1. PULSE / 2. SQUARE / 3. PRBS / 4. RAMP
CONTROL.STATE.FV_TARGET_TYPE = uint8(0);
%-----
% YAW RATE REFERENCE TYPE
% / 0. NONE / 1. PULSE / 2. SQUARE / 3. PRBS
CONTROL.STATE.YR_TARGET_TYPE = uint8(2);
%-----
```

Salvar el fichero .m (**pero no ejecutar**).

2. En este caso, el vehículo avanzará a velocidad constante (0.2 m/s) y simultáneamente girará a izquierda y derecha porque se aplica una onda cuadrada en la referencia de velocidad de giro entre -1 rad/s y +1 rad/s y periodo igual a 5 s.

### **Realización del ensayo para identificar el modelo de velocidad de giro**

Siguiendo las instrucciones incluidas la “Guía de usuario del coche”, poner en marcha el vehículo, registrar las variables de interés y, una vez concluido el ensayo, representarlas gráficamente y guardarlas en un fichero .mat.

### **Identificación del modelo de velocidad de giro**

1. A partir de este ensayo, se van a estimar los parámetros del modelo detallado que afectan exclusivamente al giro del vehículo mediante un ajuste por mínimos cuadrados. La entrada es la referencia de velocidad de giro y la salida es la velocidad de giro medida y filtrada. Los parámetros estimados son la caída de tensión diferencial en el convertidor PWM que alimenta cada motor, el momento de inercia y la fricción viscosa del vehículo.
2. En el fichero /CONFIGURATION / CONFIG\_CAR.m, definir RUN\_MODE = 2.
3. En la sección FIT MODE del fichero /SOFTWARE\_COMPONENTS / MODEL / MODEL\_IDENT.m, definir FIT\_MODE = 5. De esta manera, se usarán los datos de velocidad de giro en la identificación del modelo. **Importante:** hay que cargar el fichero .mat que los contiene si no estuvieran ya cargados en memoria.
4. Ejecutar el fichero MODEL\_IDENT.m para estimar los parámetros óptimos del modelo. Durante la identificación, se representa en un mismo gráfico y en cada iteración la respuesta real, la obtenida con el modelo y la diferencia entre ambas. La ejecución termina automáticamente en un máximo de 10 iteraciones. La ejecución puede detenerse únicamente pulsando el botón de STOP en el osciloscopio contenido en el bloque TEST: SCOPES, dentro del subsistema /MONITORING en el fichero CAR\_CONTROL\_SYSTEM.slx.
7. Una vez terminado el proceso de identificación, copiar el texto en pantalla donde se definen todos los parámetros y pegar dicho texto en la sección “ESTIMATED PARAMETERS...” del fichero /SOFTWARE\_COMPONENTS / MODEL / CONFIG\_MODEL.m y **salvar el fichero**. De esta forma, se sustituyen los valores definidos por defecto para los parámetros del modelo por los estimados a partir del ensayo. Guardar también la gráfica generada en la última iteración en una figura de Matlab.
5. Copiar la función de transferencia identificada para el modelo de velocidad de giro se puede visualizar ejecutando CONFIG\_CAR.m con RUN\_MODE = 1 y mirando la variable YAW\_RATE\_TF (formato tf) y la variable YAW\_RATE\_ZPK (formato TimeConstant).

### **Antes de dejar el laboratorio**

- Apuntar el coche con el que trabaja cada grupo.
- Guardar en lugar seguro los ficheros .mat de los dos ensayos.
- Si se ha completado la identificación, guardar en lugar seguro el fichero CONFIG\_MODEL.m

## Trabajo posterior

Redactar un breve informe que debe incluir lo siguiente:

- Parámetros estimados y funciones de transferencia identificadas para los modelos de velocidad de avance y velocidad de giro.
- Gráfica con los resultados de la identificación en ambos casos.

## 4. Sesión 2: Predictor de Smith

Una vez identificados los modelos sin retardo durante la sesión 1, añadimos un retardo en la aplicación del mando igual a 50 ms y se procede a diseñar un control PID para dicha planta. Sólo se abordará en profundidad el problema del control de la velocidad de avance, ya que la planta para el giro del vehículo es muy parecida y los resultados y conclusiones serían similares.

El objetivo de esta segunda sesión es comprobar la limitación de rapidez de respuesta para un control PID estándar cuando se aplica a una planta con un retardo considerable y cómo se puede incrementar la rapidez usando un predictor de Smith.

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  $C(s) = K \left( 1 + \frac{1}{T_{is}} + \frac{T_{ds}}{1+\frac{T_{ds}}{N}} \right)$ : se utiliza para implantar el control.
- El diagrama de bloques general que se usará para la implantación de los controles en formato paralelo es el mostrado en la figura 5. 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 se discretiza mediante la regla trapezoidal.

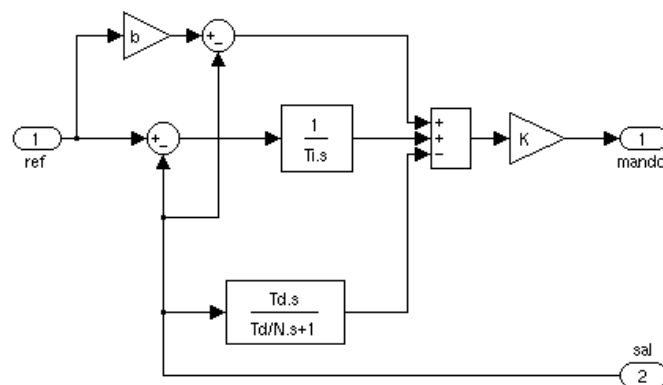


Figura 5: Estructura en paralelo del control PID

El paso de formato serie a formato paralelo y la discretización mediante la regla trapezoidal se realizan en el *firmware* del vehículo, por lo cual la única tarea que debe realizar el alumno es el diseño del control PID usando el modelo analógico modificado. Recuérdese que, para que este diseño sea válido, debe cumplirse que el producto de la pulsación de cruce por el período de muestreo  $\omega_o T_s$  sea inferior a 1.

En general, el control PID será de dos grados de libertad con dos funciones de transferencia diferentes:  $C_r(s)$  aplicada a la referencia y  $C(s)$  aplicada a la medida. Cuando esas dos funciones de transferencia coinciden, se dice que el control es de un solo grado de libertad. El control PID en formato paralelo es de dos grados de libertad si la acción diferencial se aplica a la salida o la ponderación de la referencia no vale 1.

La aplicación del predictor de Smith para un control PID de dos grados de libertad se realiza tal como se muestra en la figura 6.

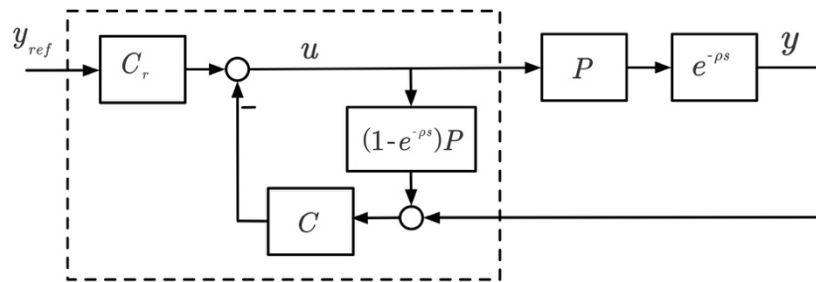


Figura 6: Diagrama de bloques del predictor de Smith para una planta con retardo

### Trabajo previo

Revisar toda la teoría incluida en los apuntes relativa al diseño de un control PID por respuesta en frecuencia y a la aplicación del predictor de Smith en plantas con retardo.

### Diseño del control PID para la planta con retardo

1. Ejecutar `/CONFIGURATION / CONFIG_CAR.m`, definiendo previamente `RUN_MODE = 1`. Las plantas para diseñar el control PID se generan en el *workspace*. Aparecen dos funciones de transferencia en formato **tf**: `FORWARD_VEL_TF`, que no incluye el retardo, y `FORWARD_VEL_DELAY_TF` que sí lo incluye. Puede comprobarse el valor de estas variables desde la ventana de comandos.
2. Con la ayuda de la herramienta gráfica de diseño de PID's por respuesta en frecuencia (carpeta `/GUI`), diseñar un control PI por margen de fase lo más rápido posible para la planta con retardo `FORWARD_VEL_DELAY_TF` y usando el modelo analógico modificado (período de muestreo igual a 10 ms). Usar como criterio de rapidez el tiempo de establecimiento al 5% para respuesta a escalón en referencia con máxima sensibilidad  $M_s$  inferior a 3 dB, sobrepaso no superior al 15% y máximo mando para escalón unitario menor que 35. Puede modificarse la ponderación de la referencia hasta un valor máximo igual a 2.
3. Repetir el diseño usando ahora el margen de ganancia como margen de estabilidad y discutir cuál de ellos es más adecuado en este caso.
4. Usando las especificaciones previas, aplicar acción diferencial al control con factor de filtrado igual a 0.1 y comprobar si es posible reducir de forma significativa el tiempo de alcance. La acción diferencial puede aplicarse al error o a la salida.

### Simulación del control PID para la planta con retardo

1. En la carpeta `/SOFTWARE_COMPONENTS / CONTROL`, acceder al fichero `CONFIG_CONTROL.m` para definir en las secciones del código indicadas a continuación la configuración adecuada del sistema de control: control PID de las

velocidades de avance y giro, aplicando una onda cuadrada en la referencia de velocidad de avance y un valor nulo en la referencia de velocidad de giro, e incluyendo un retardo simulado en la planta real, con el predictor de Smith desactivado:

```
%-----
%% CONTROL MODE
%-----
% / 0. OPEN LOOP / 1. FORWARD VELOCITY AND YAW ANGLE /
% / 2. FORWARD VELOCITY AND YAW RATE / 3. NAVIGATION /
% / 4. WALL FOLLOWER / 5. WALL FOLLOWING COMPETITION /
% / 6. NAVIGATION COMPETITION / 7. FORWARD VELOCITY COMPETITION /
CONTROL.STATE.CONTROL_MODE = uint8(2);

%-----
%% CONTROL TYPES
%-----
% FORWARD VELOCITY CONTROL TYPE
% / 0. PID / 1. STATE FEEDBACK CONTROL
CONTROL.STATE.FORWARD_VEL_CONTROL_TYPE = uint8(0);

%-----
% YAW RATE CONTROL TYPE
% / 0. PID / 1. STATE FEEDBACK CONTROL
CONTROL.STATE.YAW_RATE_CONTROL_TYPE = uint8(0);

%-----
%% REFERENCE DEFINITION
%-----
% FORWARD VELOCITY REFERENCE TYPE
% / 0. CONSTANT / 1. PULSE / 2. SQUARE / 3. PRBS / 4. RAMP
CONTROL.STATE.FV_TARGET_TYPE = uint8(2);

%-----
% YAW RATE REFERENCE TYPE
% / 0. NONE / 1. PULSE / 2. SQUARE / 3. PRBS
CONTROL.STATE.YR_TARGET_TYPE = uint8(0);

%-----
%% DELAY IN MOTOR VOLTAGE
%-----
% MOTOR DELAY MODE
% / 0. WITHOUT DELAY / 1. SIMULATED DELAY / 2. ACTUAL DELAY
CONTROL.STATE.MOTOR_DELAY_MODE = uint8(1);

%-----
% SMITH PREDICTOR FOR FORWARD-VELOCITY AND YAW-RATE CONTROL
% / 0. DESIGN WITH DELAY / 1. SMITH PREDICTOR / 2. DESIGN WITHOUT DELAY
CONTROL.STATE.SP_MODE = uint8([0 0]);
%-----
```

- Introducir las especificaciones de diseño por respuesta en frecuencia del control PID de velocidad de avance para la planta con retardo en la sección FORWARD VELOCITY: CAR PID CONTROL del fichero **CONFIG\_CONTROL.m**. Las especificaciones de respuesta en frecuencia que aparecen a continuación son valores por defecto.

```
%-----
%% FORWARD VELOCITY: CAR PID CONTROL
%-----
% Control type
% / 1. Control P / 2. Control PI
% / 3. Control PD error / 4. Control PD output
% / 5. Control PID error / 6. Control PID output
FWD_VEL_PID.control_type = 1;
if CONTROL.STATE.PID_DESIGN_METHOD == 0 % Frequency response
    % Phase margin (deg)
```

```
FWD_VEL_PID.phase_margin_deg = 80;
% Gain margin (dB)
FWD_VEL_PID.gain_margin_dB = 0;
% Design frequency (rad/s): k = w_d/w_d_P
FWD_VEL_PID.k_wd_P = 1;
% Reference weight
FWD_VEL_PID.b = 1;
% Lag phase of the integral action (deg)
FWD_VEL_PID.lag_phase_deg = -5;
% Filtering factor of the derivative action
FWD_VEL_PID.f = 0.1;
else % Time response
% Damping factor
FWD_VEL_PID.damping_factor = 0.8;
% Design frequency (rad/s): k = w_d/w_d_P
FWD_VEL_PID.k_wd_P = 0.9;
% Reference weight
FWD_VEL_PID.b = 1;
% delta = wn*Ti between 1 and 5. Faster and more noisy for 1
FWD_VEL_PID.delta = 5;
% Filtering factor of the derivative action
FWD_VEL_PID.N = 3;
end
%-----
```

3. Seguir las instrucciones incluidas en la “Guía de usuario del coche” para la realización de la simulación y verificar que los parámetros del control incluidos en la variable `CONTROL_INI.PARAM.FORWARD_VEL_PID` coinciden con los calculados por la herramienta gráfica de diseño y que la respuesta de simulación es la esperada.

### Diseño del control PID para la planta sin retardo (predicador de Smith)

Con la ayuda de la herramienta gráfica de diseño de PID por respuesta en frecuencia, diseñar un control por margen de fase lo más rápido posible para la planta sin retardo `FORWARD_VEL_TF` y usando el modelo analógico modificado (período de muestreo igual a 10 ms). Usar como criterio de rapidez el tiempo de establecimiento al 5% con máxima sensibilidad  $M_s$  inferior a 3 dB, sobrepaso no superior al 15% y máximo mando para escalón unitario menor que 35. Si se usa acción diferencial, limitar el factor de filtrado a un valor igual a 0.1. Puede modificarse la ponderación de la referencia libremente hasta un valor máximo igual a 2 y aplicarse la acción diferencial al error o a la medida.

### Simulación del control PID con predicador de Smith

1. En la carpeta `SOFTWARE_COMPONENTS/CONTROL`, acceder al fichero `CONFIG_CONTROL.m` para definir la configuración adecuada del sistema de control, incluyendo un retardo simulado en la planta real y con el predicador de Smith activado sólo para la velocidad de avance. La modificación que hay que introducir en la sección `DELAY IN MOTOR VOLTAGE` con respecto a la configuración anterior es la siguiente:

```
%-----
%% DELAY IN MOTOR VOLTAGE
%-----
% MOTOR DELAY MODE
% / 0. WITHOUT DELAY / 1. SIMULATED DELAY / 2. ACTUAL DELAY
CONTROL.STATE.MOTOR_DELAY_MODE = uint8(1);
%-----
% SMITH PREDICTOR FOR FORWARD-VELOCITY AND YAW-RATE CONTROL
% / 0. DESIGN WITH DELAY / 1. SMITH PREDICTOR / 2. DESIGN WITHOUT DELAY
CONTROL.STATE.SP_MODE = uint8([1 0]);
%-----
```



2. Introducir las especificaciones de diseño del control PID de velocidad de avance para la planta sin retardo en el fichero **CONFIG\_CONTROL.m**, sección FORWARD VELOCITY: PID CONTROL.
3. Seguir las instrucciones incluidas en la “Guía de usuario del coche” para la realización de la simulación y verificar que los parámetros del control incluidos en la variable `CONTROL_INI.PARAM.FORWARD_VEL_PID` coinciden con los calculados por la herramienta gráfica de diseño y que la respuesta de simulación es la esperada.

### ***Trabajo de laboratorio***

#### **Ensayo del control PID para la planta con retardo**

1. En la carpeta **/SOFTWARE\_COMPONENTS / CONTROL**, acceder al fichero **CONFIG\_CONTROL.m** para definir la configuración adecuada del sistema de control: control PID de las velocidades de avance y giro, aplicando una onda cuadrada en la referencia de velocidad de avance y un valor nulo en la referencia de velocidad de giro, e incluyendo un retardo simulado en la planta real, con el predictor de Smith desactivado (idénticas a las definidas para la simulación en trabajo previo).
2. Introducir las especificaciones de diseño del control PID de velocidad de avance para la planta con retardo en el fichero **CONFIG\_CONTROL.m**.
3. Seguir las instrucciones incluidas en la “Guía de usuario del coche” para la realización del ensayo, verificando que los parámetros del control incluidos en la variable `CONTROL_INI.PARAM.FORWARD_VEL_PID` coinciden con los calculados por la herramienta gráfica de diseño. Se deben guardar los datos del ensayo en un fichero **.mat**.

#### **Comparación de la simulación y el ensayo del control PID para la planta con retardo**

Seguir las instrucciones incluidas en la “Guía de usuario del coche” para la comparación de la simulación y el ensayo. Guardar la gráfica generada con la comparación de las variables más relevantes en una figura de Matlab.

#### **Ensayo del control PID con predictor de Smith**

1. En la carpeta **/SOFTWARE\_COMPONENTS / CONTROL**, acceder al fichero **CONFIG\_CONTROL.m** para definir la configuración adecuada del sistema de control: control PID de las velocidades de avance y giro, incluyendo un retardo simulado en la planta real y con el predictor de Smith activado sólo en la velocidad de avance (idénticas a las definidas para la simulación en trabajo previo).
2. Introducir las especificaciones de diseño del control PID de velocidad de avance para la planta sin retardo en el fichero **CONFIG\_CONTROL.m**.
3. Seguir las instrucciones incluidas en la “Guía de usuario del coche” para la realización del ensayo, verificando que los parámetros del control incluidos en la variable `CONTROL_INI.PARAM.FORWARD_VEL_PID` coinciden con los calculados por la herramienta gráfica de diseño. Se deben guardar los datos del ensayo en un fichero **.mat**.

### **Comparación de simulación y ensayo para el control PID con predictor de Smith**

Seguir las instrucciones incluidas en la “Guía de usuario del coche” para la comparación de la simulación y el ensayo. Guardar la gráfica generada con la comparación de las variables más relevantes.

### **Comparación de todos los ensayos realizados con el vehículo**

Seguir las instrucciones incluidas en la “Guía de usuario del coche” para la comparación de los ensayos realizados usando el fichero **/PLOT\_FILES / PLOT\_COMP\_FILES**. Guardar la gráfica generada con la comparación de las variables más relevantes.

### **Opcional: análisis de robustez del predictor de Smith**

Investigar la influencia de un error en la estimación del retardo modificando el valor de la variable `MODEL.PARAM.MOTOR_DELAY_ERR` en el fichero **CONFIG\_MODEL**, sección `DELAY IN MOTOR VOLTAGE`. Esta variable debe ser múltiplo de 10 ms y su valor puede ser positivo o negativo en función de que se desee incrementar o reducir el retardo real en la aplicación del mando. El retardo utilizado en el diseño del control y en la implantación del predictor de Smith no se modifica.

### ***Trabajo posterior***

Redactar un breve informe que debe incluir lo siguiente:

- Figuras de la interfaz gráfica de diseño de PID con todos los controles diseñados durante esta sesión para el modelo de velocidad de avance, con retardo y sin él.
- Gráficas con la comparación de la simulación y el ensayo del control PID sin incluir el predictor de Smith e incluyéndolo. Debe ampliarse el detalle de la comparación para las señales más relevantes.
- Gráfica con la comparación de los diferentes ensayos (o en su defecto simulaciones) del control PID sin incluir el predictor de Smith e incluyéndolo. Debe ampliarse el detalle de la comparación para las señales más relevantes.
- Conclusiones de la sesión práctica.

Se valorará especialmente la inclusión de comentarios originales que resalten aspectos interesantes de los gráficos presentados.

## **5. Sesión 3: Control en cascada**

En esta tercera sesión se aborda el modo de navegación con seguimiento de pared. Se supone que no hay retardo real en la planta. Por lo tanto, el control de la velocidad de avance del vehículo será un control PI que garantice error de seguimiento nulo sin excesivo ruido.

El objetivo es mantener la distancia a la pared en un valor deseado o de referencia, incluso en presencia de perturbaciones significativas como pueden ser la asimetría de los motores (offset en la tensión diferencial), un cambio en la referencia de velocidad de avance o la llegada a una curva.

En la sección 1 de este documento se introdujo la representación de estado no lineal que relaciona la componente diferencial de la tensión de los motores  $u_d$  con la distancia a la

pared  $d_n$ . Dicho modelo se linealizó en un punto de operación genérico y se obtuvo la siguiente función de transferencia para la planta:

$$P(s) = \frac{\overbrace{K_m}^{P_1(s)}}{(1 + T_m s)s} \times \frac{\overbrace{-v_o \left(1 + \frac{x_A}{v_o} s\right)}^{P_2(s)}}{s} = \frac{-v_o K_m \left(1 + \frac{x_A}{v_o} s\right)}{(1 + T_m s)s^2}$$

Nótese que dicha función de transferencia tiene un doble integrador, lo cual dificulta la aplicación de un control PID estándar, aunque la presencia de un cero negativo ( $x_A > 0$ ) mitiga en parte este problema. Sin embargo, la función de transferencia se puede descomponer en dos subsistemas conectados en serie con una señal intermedia, el ángulo  $\alpha$  de orientación con respecto a la pared, cuya medida está disponible.

Un principio básico en el diseño de un sistema de control es que cuanto más información se utilice de la planta más ambiciosos pueden ser los objetivos de control. Es decir, emplear más medidas en la realimentación del sistema de control siempre permite mejorar la respuesta a referencia y/o a perturbación e incrementar la robustez del sistema frente a errores de modelado. Una consecuencia de este principio sería que la aplicación de un control PID en cascada en el seguimiento de la pared debe ofrecer mejores resultados que el control PID de distancia mediante un único lazo.

En esta sesión se diseñarán y compararán ambos controles con el fin de verificar la validez de la afirmación anterior. Se trata, por lo tanto, de aplicar al seguimiento de la pared las estructuras de control mostradas en la figura 7.

La variable controlada  $y$  es la distancia a la pared, la variable intermedia  $y_i$  es el ángulo de orientación con respecto a la pared, la variable de control  $u$  es la componente diferencial de la tensión de los motores, la perturbación  $d_1$  representa la variación de la orientación de la pared con respecto al vehículo (llegada a una curva) y la perturbación  $d_2$  podría representar el efecto del cambio de velocidad sobre la distancia a la pared.

Se supone que todos los controles PID diseñados en ambas estructuras son de dos grados de libertad, tal como se muestra en la figura 7. La referencia de velocidad de avance se fijará a 0.2 m/s.

En la planta de seguimiento de pared existe una tercera perturbación que se suma a la variable de control  $u$  y que representa de forma simplificada el efecto de la asimetría de los motores. Esta perturbación provoca en cualquier control de seguimiento de pared sin acción integral un error en régimen permanente que dependerá del grado de asimetría entre los motores. Si dicho error es significativo, se puede reducir o anular si se activa la compensación de dicha perturbación mediante prealimentación y/o se añade acción integral al control.

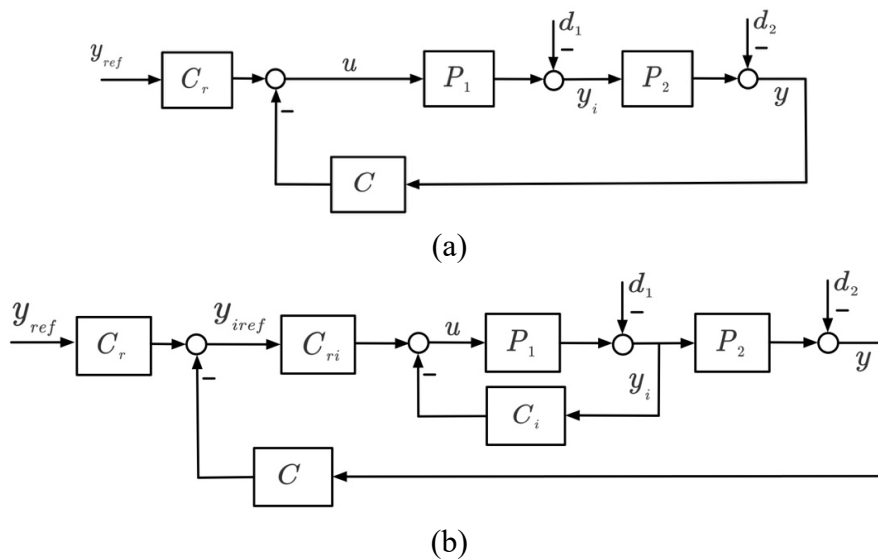


Figura 7: Control de un único lazo (a) y control en cascada (b)

### Trabajo previo

Revisar toda la teoría incluida en los apuntes relativa al control PID en cascada.

### Diseño del control PID de un solo lazo

1. Ejecutar el fichero `/CONFIGURATION / CONFIG_CAR.m`, definiendo previamente `RUN_MODE = 1`, para generar la planta con la que diseñar el control PID de distancia de un solo lazo. La función de transferencia de la planta se genera en el *workspace* y se almacena en la variable `WFL_SL_TF`. Puede comprobarse el valor de esta variable desde la ventana de comandos.
2. Con la ayuda de la herramienta gráfica de diseño de un control PID por respuesta en frecuencia (carpeta **GUI**), diseñar un control P para obtener el mayor margen de fase que sea posible para la planta de distancia `WFL_SL_TF` y usando el modelo analógico. Es necesario cambiar el signo de la función de transferencia de la planta para hacer el diseño.
3. Diseñar un control PD por margen de fase para proporcionar la respuesta más rápida posible (mínimo tiempo de establecimiento al 5%) y limitar la máxima sensibilidad a 3 dB, el sobrepaso al 15% y el máximo mando para escalón unitario a 50. Debe especificarse la pulsación de cruce de forma absoluta y no de forma relativa a la del control P para el mismo margen de fase, ya que esta puede no estar definida. El factor de filtrado debe ser 0.1 y la acción diferencial puede aplicarse al error o a la salida. Téngase en cuenta que en la herramienta gráfica de diseño aparecerá habilitado el campo de edición de la pulsación de cruce del control P si no se puede diseñar el control P con el margen de fase especificado. En este caso, se debe definir manualmente la pulsación de cruce del control P y el factor a aplicar para obtener la pulsación de cruce del control PD, que es el resultado de multiplicar ambos parámetros.

## Simulación del control PID de un solo lazo

1. En la carpeta /SOFTWARE\_COMPONENTS / CONTROL, acceder al fichero **CONFIG\_CONTROL.m** para definir la configuración adecuada del sistema de control: navegación mediante seguimiento de pared, aplicando un control PID de un solo lazo, usando una onda cuadrada en la referencia de distancia a la pared, con la prealimentación de la perturbación de la tensión diferencial desactivada y sin retardo en la planta real:

```
%-----
%% CONTROL MODE
%-----
% / 0. OPEN LOOP / 1. FORWARD VELOCITY AND YAW ANGLE /
% / 2. FORWARD VELOCITY AND YAW RATE / 3. NAVIGATION /
% / 4. WALL FOLLOWER / 5. WALL FOLLOWING COMPETITION /
% / 6. NAVIGATION COMPETITION / 7. FORWARD VELOCITY COMPETITION /
CONTROL.STATE.CONTROL_MODE = uint8(4);

%-----
%% CONTROL TYPES
%-----
% FORWARD VELOCITY CONTROL TYPE
% / 0. PID / 1. STATE FEEDBACK CONTROL
CONTROL.STATE.FORWARD_VEL_CONTROL_TYPE = uint8(0);
%-----
% YAW RATE CONTROL TYPE
% / 0. PID / 1. STATE FEEDBACK CONTROL
CONTROL.STATE.YAW_RATE_CONTROL_TYPE = uint8(0);
%-----
% YAW ANGLE CONTROL TYPE
% / 0. PID / 1. STATE FEEDBACK CONTROL
CONTROL.STATE.YAW_ANG_CONTROL_TYPE = uint8(0);
%-----
% WALL FOLLOWER CONTROL TYPE
% / 0. SINGLE LOOP / 1. CASCADE / 2. STATE FEEDBACK CONTROL
CONTROL.STATE.WFL_CONTROL_TYPE = uint8(0);
%-----

%-----
%% REFERENCE DEFINITION
%-----
% FORWARD VELOCITY REFERENCE TYPE
% / 0. CONSTANT / 1. PULSE / 2. SQUARE / 3. PRBS / 4. RAMP
CONTROL.STATE.FV_TARGET_TYPE = uint8(0);
%-----
% YAW RATE REFERENCE TYPE
% / 0. NONE / 1. PULSE / 2. SQUARE / 3. PRBS
CONTROL.STATE.YR_TARGET_TYPE = uint8(0);
%-----
% YAW ANGLE REFERENCE TYPE
% / 0. NONE / 1. PULSE / 2. SQUARE / 3. PRBS
CONTROL.STATE.YA_TARGET_TYPE = uint8(0);
%-----
% WALL DISTANCE REFERENCE TYPE
% / 0. CONSTANT = 0.1 m / 1. PULSE / 2. SQUARE / 3. PRBS / 4. CURVE
CONTROL.STATE.WD_TARGET_TYPE = uint8(2);
%-----

%-----
%% FEEDFORWARD (MOTOR VOLTAGE DROP IN DIFFERENTIAL MODE)
%-----
% VOLTAGE DROP IN DIFFERENTIAL MOTOR VOLTAGE
% / 0. NOT ENABLED / 1. ENABLED
CONTROL.STATE.WFL_FEEDFORWARD = uint8(0);
%-----

%-----
%% DELAY IN MOTOR VOLTAGE
%-----
```

```
% MOTOR DELAY MODE
% / 0. WITHOUT DELAY / 1. SIMULATED DELAY / 2. ACTUAL DELAY
CONTROL.STATE.MOTOR_DELAY_MODE = uint8(0);
%-----
% SMITH PREDICTOR FOR FORWARD-VELOCITY AND YAW-RATE CONTROL
% / 0. DESIGN WITH DELAY / 1. SMITH PREDICTOR / 2. DESIGN WITHOUT DELAY
CONTROL.STATE.SP_MODE = uint8([0 0]);
%-----
```

2. Introducir las especificaciones de diseño del control PID de velocidad de avance para la planta sin retardo en el fichero **CONFIG\_CONTROL.m**.
3. Introducir las especificaciones de diseño del control PID de un solo lazo para la distancia a la pared en el fichero **CONFIG\_CONTROL.m**. Las especificaciones que aparecen en el código incluido a continuación son los valores por defecto. Aparecen 4 valores distintos para cada especificación, que se corresponden con los 4 puntos de operación definidos para la planta (4 velocidades de avance diferentes). El punto de operación utilizado en el ensayo está definido en la variable `CONTROL.STATE.FORWARD_VEL_MAIN_OP` (sección OPERATING POINTS (FORWARD VELOCITY)), y por defecto corresponde al primer punto de operación (velocidad de avance igual a 0.2 m/s). Por lo tanto, en esta sesión sólo es necesario modificar el primero de los cuatro valores definidos para cada especificación. La pulsación de cruce se define de forma absoluta en rad/s.

```
%-----
%% WALL FOLLOWER: SINGLE-LOOP PID
%-----
% Control type
% / 1. Control P / 2. Control PI
% / 3. Control PD error / 4. Control PD output
% / 5. Control PID error / 6. Control PID output
WFL_SL_PID.control_type = 1;
% Phase margin (deg)
WFL_SL_PID.phase_margin_deg = [20 20 20 20];
% Design frequency (rad/s): k = w_d/w_d_P
WFL_SL_PID.k_wd_P = [1.5 1.5 1.5 1.5];
% Reference weight
WFL_SL_PID.b = [1.00 1.00 1.00 1.00];
% Lag phase of the integral action (deg)
WFL_SL_PID.lag_phase_deg = [-5 -5 -5 -5];
% Filtering factor of the derivative action
WFL_SL_PID.f = [0.1 0.1 0.1 0.1];
%-----
```

4. Las referencias que se aplican en el ensayo (definidas por defecto) son una velocidad constante en la referencia de velocidad de avance igual a 0.2 m/s y una onda cuadrada en la referencia de distancia a la pared con valores entre 0.075 m y 0.1 m y período igual a 10 s.
5. Seguir las instrucciones incluidas en la “Guía de usuario del coche” para la realización de la simulación, verificando que `CONTROL_INI.PARAM.FORWARD_VEL_PID` y `CONTROL_INI.PARAM.WFL_SL_PID` contienen los mismos parámetros que los proporcionados por la herramienta gráfica de diseño. Comprobar también que la respuesta simulada es la esperada.
6. Activar la prealimentación de la perturbación de la tensión diferencial y comprobar su efecto sobre el error de distancia en régimen permanente. Valorar la utilidad de mantener activada dicha prealimentación durante el resto de la práctica.

### Diseño del control PID en cascada

1. Se pretende diseñar un control P para el lazo interno de control del ángulo de orientación, eliminando de esta forma una integración en la planta en el diseño del lazo externo de control de distancia. El control P interno se va a diseñar a partir de la función de transferencia `YAW_ANG_TF`. El diseño se realiza por respuesta en frecuencia con la ayuda de la herramienta gráfica incluida en la carpeta **GUI**. El control de la velocidad de avance del vehículo será el diseñado en la sesión 2 para el caso de aplicación del predictor de Smith, pero sin incluir este.
2. Diseñar un control P por margen de fase para el lazo interno con sobrepaso inferior al 15%. Emplear el modelo analógico para realizar el diseño. El diseño del lazo interno influirá sobre la respuesta final del lazo externo, por lo que puede ser necesario un diseño iterativo para optimizar la respuesta final.
3. Introducir las especificaciones de diseño del control P para el lazo interno en el fichero **CONFIG\_CONTROL.m**. Las especificaciones que aparecen a continuación son los valores por defecto.
4. 

```
%-----
%% YAW ANGLE: PID CONTROL
%-----
% Control type
% / 1. Control P / 2. Control PI
% / 3. Control PD error / 4. Control PD output
% / 5. Control PID error / 6. Control PID output
YAW_ANG_PID.control_type = 1;
% Phase margin (deg)
YAW_ANG_PID.phase_margin_deg = 75;
% Gain margin (dB)
YAW_ANG_PID.gain_margin_dB = 0;
% Design frequency (rad/s): k = w_d/w_d_P
YAW_ANG_PID.k_wd_P = 1;
% Reference weight
YAW_ANG_PID.b = 1;
% Lag phase of the integral action (deg)
YAW_ANG_PID.lag_phase_deg = -10;
% Filtering factor of the derivative action
YAW_ANG_PID.f = 0.1;
%-----
```

5. Definiendo previamente `RUN_MODE = 1`, ejecutar el fichero **CONFIG\_CAR.m**. La función de transferencia para el diseño del control PID del lazo externo está definida en la variable `WFL_CD_TF` del *workspace*.
6. Con la ayuda de la herramienta gráfica de diseño de PID's por respuesta en frecuencia, diseñar por margen de fase un control PD o PID para la planta `WFL_CD_TF` usando el modelo analógico. El control diseñado debe anular el error de seguimiento en régimen permanente, proporcionar la respuesta más rápida que sea posible (mínimo tiempo de establecimiento al 5%), limitando el sobrepaso a un 15%, la máxima sensibilidad a 3 dB y el máximo mando para escalón unitario a 20. El factor de filtrado debe ser 0.1 y la acción diferencial puede aplicarse al error o a la salida. Es necesario cambiar el signo de la función de transferencia de la planta para hacer el diseño.

### Simulación del control PID en cascada

1. En la carpeta `/SOFTWARE_COMPONENTS / CONTROL`, acceder al fichero **CONFIG\_CONTROL.m** para definir la configuración adecuada del sistema de control: navegación mediante seguimiento de pared, sin retardo en la planta real, con



la prealimentación activada y aplicando un control PID en cascada. La única modificación que hay que introducir con respecto a la configuración previa es la siguiente:

```
%-----
%% CONTROL TYPES
%-----
. . .
%-----
% WALL FOLLOWER CONTROL TYPE
% / 0. SINGLE LOOP / 1. CASCADE / 2. STATE FEEDBACK CONTROL
CONTROL.STATE.WFL_CONTROL_TYPE = uint8(1);
%-----
```

- Introducir las especificaciones de diseño del control PID para el control del lazo externo en el fichero **CONFIG\_CONTROL.m**. Las especificaciones que aparecen en el código incluido a continuación son los valores por defecto. Aparecen 4 valores distintos para cada especificación, que se corresponden con los 4 puntos de operación definidos para la planta (4 velocidades de avance diferentes). El punto de operación utilizado en el ensayo está definido en la variable `CONTROL.STATE.FORWARD_VEL_MAIN_OP`, y por defecto corresponde al primer punto de operación (velocidad de avance igual a 0.2 m/s). Por lo tanto, en esta sesión sólo es necesario modificar el primero de los cuatro valores definidos para cada especificación.

```
%-----
%% WALL FOLLOWER: CASCADE CONTROL
%-----
% Control type
% / 1. Control P / 2. Control PI
% / 3. Control PD error / 4. Control PD output
% / 5. Control PID error / 6. Control PID output
WFL_CD_PID.control_type = 1;
% Phase margin (deg)
WFL_CD_PID.phase_margin_deg = [60 60 60 60];
% Design frequency (rad/s): k = w_d/w_d_P
WFL_CD_PID.k_wd_P = [0.9 0.9 0.9 0.9];
% Reference weight
WFL_CD_PID.b = [1.00 1.00 1.00 1.00];
% Lag phase of the integral action (deg)
WFL_CD_PID.lag_phase_deg = [-5 -5 -5 -5];
% Filtering factor of the derivative action
WFL_CD_PID.f = [0.1 0.1 0.1 0.1];
%-----
```

- Seguir las instrucciones incluidas en la “Guía de usuario del coche” para la realización de la simulación, verificando que `CONTROL_INI.PARAM.FORWARD_VEL_PID`, `CONTROL_INI.PARAM.YAW_ANG_PID` y `CONTROL_INI.PARAM.WFL_CD_PID` contienen los mismos parámetros que los proporcionados por la herramienta gráfica de diseño. Comprobar también que la respuesta simulada es la esperada.

## Trabajo de laboratorio

### Ensayo del control PID de un solo lazo con una onda cuadrada en la referencia

- En la carpeta `/SOFTWARE_COMPONENTS / CONTROL`, acceder al fichero **CONFIG\_CONTROL.m** para definir la configuración adecuada del sistema de control: navegación mediante seguimiento de pared, sin retardo en la planta real, con

la prealimentación activada, aplicando un control PID de un solo lazo y usando una onda cuadrada en la referencia de distancia.

2. Introducir las especificaciones de diseño del control PID de velocidad de avance y del control PID de un solo lazo para el seguimiento de pared en el fichero **CONFIG\_CONTROL.m**. Modificar únicamente el primer valor de las especificaciones (punto de operación correspondiente a una velocidad de avance igual a 0.2 m/s).
3. Seguir las instrucciones incluidas en la “Guía de usuario del coche” para la realización del ensayo, verificando que `CONTROL_INI.PARAM.FORWARD_VEL_PID` y `CONTROL_INI.PARAM.WFL_SL_PID` contienen los mismos parámetros que los calculados por la herramienta gráfica de diseño. Se deben guardar los datos del ensayo en un fichero .mat.

### **Comparación de simulación y ensayo para el control PID de un solo lazo**

Seguir las instrucciones incluidas en la “Guía de usuario del coche” para la comparación de la simulación y el ensayo. Guardar la gráfica generada con la comparación de las variables más relevantes.

### **Ensayo del control PID en cascada con una onda cuadrada en la referencia**

1. En la carpeta **/SOFTWARE\_COMPONENTS / CONTROL**, acceder al fichero **CONFIG\_CONTROL.m** para definir la configuración adecuada del sistema de control: navegación mediante seguimiento de pared, sin retardo en la planta real, con la prealimentación activada, aplicando un control PID en cascada y usando una onda cuadrada en la referencia de distancia.
2. Introducir las especificaciones de diseño del control PID de velocidad de avance, del control P de ángulo de orientación con respecto a la pared y del control PID en cascada para el seguimiento de pared en el fichero **CONFIG\_CONTROL.m**. Para este último control, modificar únicamente el primer valor de las especificaciones (punto de operación correspondiente a una velocidad de avance igual a 0.2 m/s).
3. Seguir las instrucciones incluidas en la “Guía de usuario del coche” para la realización del ensayo, verificando que `CONTROL_INI.PARAM.FORWARD_VEL_PID`, `CONTROL_INI.PARAM.YAW_ANG_PID` y `CONTROL_INI.PARAM.WFL_CD_PID` contienen los mismos parámetros que los calculados por la herramienta gráfica de diseño. Se deben guardar los datos del ensayo en un fichero .mat.

### **Comparación de simulación y ensayo para el control en cascada**

Seguir las instrucciones incluidas en la “Guía de usuario del coche” para la comparación de la simulación y el ensayo. Guardar la gráfica generada con la comparación de las variables más relevantes.

### **Comparación de los ensayos realizados con el vehículo con ambos controles**

Seguir las instrucciones incluidas en la “Guía de usuario del coche” para la comparación de los ensayos realizados usando el fichero **/PLOT\_FILES / PLOT\_COMP\_FILES**. Guardar la gráfica generada con la comparación de las variables más relevantes.

### **Ensayo con ambos controles en el circuito**

Finalmente, comprobar las prestaciones de los controles de distancia de un solo lazo y en cascada en el seguimiento de la pared del circuito con referencia de distancia a la pared constante e igual a 0.1 m, especialmente en las curvas. Registrar en cada ensayo las principales variables (velocidad de avance y su referencia, distancia a la pared y su referencia, ángulo de orientación y su referencia y mandos de tensión común y diferencial en los motores) durante los ensayos de seguimiento de pared para ambos controles y dos referencias diferentes de velocidad de avance (0.2 m/s y 0.4 m/s), sin modificar el diseño del control.

### **Opcional: diseño de un control interno más sofisticado y un control externo más simple**

Se trata de investigar si se puede mejorar la respuesta final del control de distancia si se utiliza un control de ángulo más sofisticado (PI, PD o PID) y un control de distancia más simple (P o PI). En este caso, el control de ángulo debe diseñarse con las mismas restricciones de amortiguamiento impuestas previamente (sobrepaso inferior al 15% y máxima sensibilidad inferior a 3 dB). Comparar esta alternativa del control en cascada con la diseñada durante la práctica y evaluar si se pueden obtener una respuesta más rápida.

### ***Trabajo posterior***

Redactar un breve informe que debe incluir lo siguiente:

- Figuras de la interfaz gráfica de diseño de PID con los todos los controles diseñados en esta sesión para el control PID de un solo lazo y el control PID en cascada.
- Gráficas con la comparación de la simulación y el ensayo del control PID en ambos casos cuando se aplican escalones en la referencia de distancia.
- Gráfica con la comparación de los diferentes ensayos (o en su defecto simulaciones) del control PID de un solo lazo y en cascada. Debe ampliarse el detalle de la comparación para las señales más relevantes.
- Gráficas con las principales señales registradas (velocidad de avance y su referencia, distancia a la pared y su referencia, ángulo de orientación y su referencia y mandos de tensión común y diferencial en los motores) durante los ensayos de seguimiento de pared en el circuito para ambos controles y dos referencias diferentes de velocidad de avance (0.2 m/s y 0.4 m/s).
- Conclusiones de la sesión práctica.

Se valorará especialmente la inclusión de comentarios originales que resalten aspectos interesantes de los gráficos presentados.

## **6. Sesión 4: Regulador por realimentación de estado**

En esta sesión se diseñará un control por realimentación de estado. La estructura del control por realimentación de estado más simple es la de un regulador donde el objetivo es mantener el sistema en un determinado punto de operación en presencia de perturbaciones que intentan alejarlo de él. Si existen perturbaciones persistentes o errores de modelado, el regulador no alcanzará con total éxito su objetivo y se producirá un

desvío con respecto al punto de operación deseado. Si embargo, ese desvío siempre será inferior al que se produciría si no actuase el sistema de control.

Para aplicar un control por realimentación de estado es necesario medir, o estimar, todas las variables de estado del sistema y no sólo la salida como ocurre en un control PID. El diseño del regulador por realimentación de estado consiste en determinar la matriz de ganancias (un vector en el caso monovariable) por el que multiplicar el vector de estado para obtener las variables de control que permitan cumplir con los criterios de diseño especificados.

Pueden usarse dos criterios de diseño diferentes para el control por realimentación de estado:

- *Asignación de polos*: se trata de fijar todas las dinámicas del sistema (autovalores de la matriz de estado en lazo cerrado) en los valores deseados.
- *Control LQR (Linear Quadratic Regulator)*: se trata de optimizar una función de coste que mida de alguna forma la calidad de la respuesta temporal del sistema de control.

El objetivo de esta sesión es diseñar un regulador por realimentación de estado para mantener constante la distancia a la pared del circuito en 0.1 m, independientemente de las perturbaciones que aparezcan, en este caso la asimetría de respuesta de los motores, la variación de la referencia de velocidad de avance o el trazado de una curva.

Si la representación de estado de la planta es no lineal, como es el caso del sistema de navegación mediante seguimiento de pared, el diseño del sistema de control se basa en un modelo linealizado en el punto de operación que se desea mantener. Las variables de estado y de mando que se manejan en el regulador deben ser incrementales con respecto a sus valores en el punto de operación.

En la figura 8 se representa la estructura de un regulador por realimentación de estado para una planta no lineal. En esta aplicación el vector de estado  $\mathbf{X}(t)$  está formado por la velocidad de giro del vehículo  $\omega$ , la orientación con respecto a la pared  $\alpha$ , y la distancia a la pared  $d_n$ , es decir  $\mathbf{X}(t) = [\omega \quad \alpha \quad d_n]^T$ . Sólo existe una variable de control que es la componente diferencial de la tensión de los motores, por lo que  $\mathbf{U}(t) = u_d$ . La representación de estado no lineal y en tiempo continuo de la planta es (ver sección 1 de este documento):

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{1}{T_m}\omega + \frac{K_m}{T_m}u_d$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = \omega - \omega_{pared}$$

$$\frac{dd_n}{dt} = -(v - \omega y_A)\sin(\alpha) - \omega x_A \cos(\alpha)$$

El punto de operación que se intenta mantener es  $\mathbf{X}_o = [0 \quad 0 \quad d_o]^T$ , siendo en este caso  $d_o = 0.1$  m. Para diseñar el regulador por realimentación de estado se requiere linealizar dicho modelo en el punto de operación deseado, resultando la siguiente representación de estado lineal en tiempo continuo (suponiendo velocidad de avance constante y motores idénticos en ambas ruedas):

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\alpha \\ \Delta d_n \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{1}{T_m} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ -x_A & -v_o & 0 \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\alpha \\ \Delta d_n \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{K_m}{T_m} & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}}_B \begin{bmatrix} \Delta u_d \\ \Delta\omega_{pared} \end{bmatrix}$$

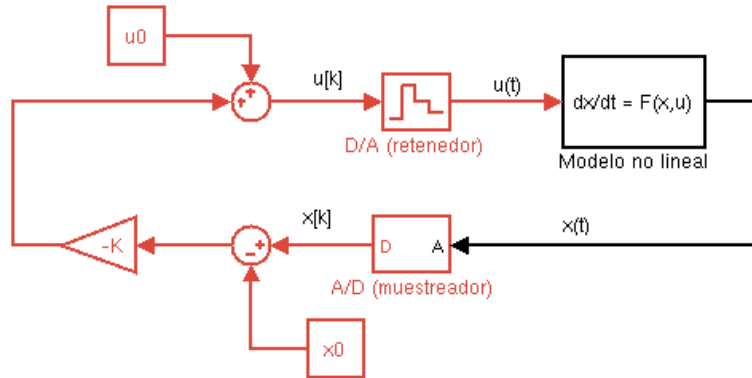


Figura 8: Regulador por realimentación de estado para una planta no lineal

Otro aspecto a tener en cuenta en las prestaciones del sistema de control es la disponibilidad de las velocidades reales de avance y de giro del vehículo. Nótese que lo que realmente hemos realimentado hasta este momento son las velocidades filtradas para atenuar el ruido introducido por los *encoders* magnéticos de los motores. Hasta ahora, no hemos reparado en ello porque también visualizábamos las velocidades filtradas en los osciloscopios y por esta razón no aparecen grandes diferencias entre los resultados de simulación y los obtenidos en los ensayos.

Sin embargo, las velocidades de avance y de giro que aparecen en el modelo anterior en variables de estado son las velocidades reales y no las filtradas. Usar las versiones filtradas puede deteriorar ligeramente la respuesta temporal del sistema de control.

En esta sesión se evaluará también la influencia sobre la respuesta de la estimación del estado completo del sistema empleando un filtro extendido de Kalman (EKF, *Extended Kalman Filter*). Las ecuaciones de estado del modelo no lineal empleado en el diseño del EKF son las siguientes:

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_{yIMU} - bias_{\omega_y} + w_y$$

$$\frac{d\psi}{dt} = \omega_{zIMU} - bias_{\omega_z} + w_z$$

$$\frac{dbias_{\omega_y}}{dt} = w_{by}$$

$$\frac{dbias_{\omega_z}}{dt} = w_{bz}$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{T_{mv}}v + \frac{K_{mv}}{T_{mv}}(u_c - bias_{u_c} + w_{uc})$$

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{1}{T_{m\omega}}v + \frac{K_{m\omega}}{T_{m\omega}}(u_d - bias_{u_d} + w_{ud})$$

$$\frac{dbias_{u_c}}{dt} = w_{bc}$$

$$\frac{dbias_{u_d}}{dt} = w_{bd}$$

$$\frac{dd_n}{dt} = -(v - \omega y_A)\sin(\psi) - \omega x_A\cos(\psi) + w_{dn}$$

$\theta$  y  $\psi$  son los ángulos de Euler (cabeceo y guiñada) del vehículo;  $bias_{\omega_y}$ ,  $bias_{\omega_z}$ ,  $bias_{u_c}$  y  $bias_{u_d}$  son los desvíos constantes asociados a las entradas del modelo, y a su vez son variables de estado;  $w_y$ ,  $w_z$ ,  $w_{by}$ ,  $w_{bz}$ ,  $w_{uc}$ ,  $w_{bc}$ ,  $w_{ud}$ ,  $w_{bd}$  y  $w_{dn}$  son los ruidos blancos asociados a las entradas y ecuaciones de estado del sistema, en total 9, una por cada ecuación de estado. La varianza de cada uno de estos ruidos mide la incertidumbre asociada a cada entrada o ecuación de estado (ruido del proceso).

Las ecuaciones de medida u observación son las siguientes:

$$a_{xIMU} = -\frac{1}{T_{mv}}v + \frac{K_{mv}}{T_{mv}}(u_c - bias_{u_c}) - g\sin(\theta) + v_x$$

$$a_{zIMU} = g\cos(\theta) + v_z$$

$$v_{ENC} = v + v_v$$

$$\omega_{ENC} = \omega + v_\omega$$

$$\omega_{zIMU} = \omega + bias_{\omega_z} + v_{\omega z}$$

$$\alpha_{ToF} = \psi + v_\alpha$$

$$d_{ToF} = d_n + v_d$$

$a_{xIMU}$  y  $a_{zIMU}$  son las componentes de la aceleración lineal medida por los acelerómetros de la IMU en los ejes X y Z del vehículo;  $g$  es la aceleración de la gravedad;  $v_{ENC}$  y  $\omega_{ENC}$  son las velocidades de avance y giro medidas con el *encoder*;  $\omega_{zIMU}$  es la velocidad de giro medida con el giróscopo de la IMU;  $\alpha_{ToF}$  y  $d_{ToF}$  son el ángulo de orientación y la distancia con respecto a la pared del circuito medidas mediante los sensores ToF;  $v_x$ ,  $v_z$ ,  $v_v$ ,  $v_\omega$ ,  $v_{\omega z}$ ,  $v_\alpha$  y  $v_d$  son los ruidos blancos asociados a las medidas de los sensores. La varianza de cada uno de estos ruidos mide la incertidumbre asociada a cada medida (ruido de medida).

El diseño del EKF se basa en definir las varianzas de los ruidos blancos del modelo de estimación. Estas varianzas se han seleccionado previamente mediante una optimización por mínimos cuadrados basada en el modelo dinámico del sistema y

de los ruidos de medida presentes en el *encoder* magnético y la IMU. Con esta selección de varianzas se consigue un nivel de filtrado similar al obtenido con los filtros paso bajo de primer orden aplicados hasta ahora, pero con un retardo muy pequeño de 6.25 ms aproximadamente, inferior incluso al período de muestreo.

Durante esta sesión se compararán los reguladores de realimentación de estado diseñados cuando se usa el filtro EKF para estimar todo el estado o cuando se utilizan las medidas directas con el filtrado paso bajo de primer orden para atenuar el ruido de los *encoders* magnéticos, de la IMU y de los sensores laterales.

Debido a que el modelo de velocidad de avance se modifica, ya que el retraso del filtro se reduce considerablemente, es conveniente verificar previamente el funcionamiento del control de velocidad de avance y reajustar el diseño de su control PID si fuera necesario.

### ***Trabajo previo***

Revisar toda la teoría incluida en los apuntes relativa al control por realimentación de estado, incluyendo el diseño de estimadores de estado.

### **Diseño de un regulador por realimentación de estado mediante asignación de polos**

1. En la carpeta /SOFTWARE\_COMPONENTS / CONTROL, acceder al fichero **CONFIG\_CONTROL.m** para definir la configuración adecuada del sistema de control: navegación mediante seguimiento de pared, aplicando un control por realimentación de estado, usando una onda cuadrada en la referencia de distancia a la pared, con la prealimentación de la perturbación de la tensión diferencial activada y sin retardo en la planta real.

```
%-----
%% CONTROL MODE
%-----
% / 0. OPEN LOOP / 1. FORWARD VELOCITY AND YAW ANGLE /
% / 2. FORWARD VELOCITY AND YAW RATE / 3. NAVIGATION /
% / 4. WALL FOLLOWER / 5. WALL_FOLLOWING COMPETITION /
% / 6. NAVIGATION COMPETITION / 7. FORWARD VELOCITY COMPETITION /
CONTROL.STATE.CONTROL_MODE = uint8(4);

%-----
%% CONTROL TYPES
%-----
% FORWARD VELOCITY CONTROL TYPE
% / 0. PID / 1. STATE FEEDBACK CONTROL
CONTROL.STATE.FORWARD_VEL_CONTROL_TYPE = uint8(0);
%-----
% YAW RATE CONTROL TYPE
% / 0. PID / 1. STATE FEEDBACK CONTROL
CONTROL.STATE.YAW_RATE_CONTROL_TYPE = uint8(0);
%-----
% YAW ANGLE CONTROL TYPE
% / 0. PID / 1. STATE FEEDBACK CONTROL
CONTROL.STATE.YAW_ANG_CONTROL_TYPE = uint8(0);
%-----
% WALL FOLLOWER CONTROL TYPE
% / 0. SINGLE LOOP / 1. CASCADE / 2. STATE FEEDBACK CONTROL
CONTROL.STATE.WFL_CONTROL_TYPE = uint8(2);
%-----

%-----
%% REFERENCE DEFINITION
%-----
% FORWARD VELOCITY REFERENCE TYPE
```



```
% / 0. CONSTANT / 1. PULSE / 2. SQUARE / 3. PRBS / 4. RAMP
CONTROL.STATE.FV_TARGET_TYPE = uint8(0);
%-----
% YAW RATE REFERENCE TYPE
% / 0. NONE / 1. PULSE / 2. SQUARE / 3. PRBS
CONTROL.STATE.YR_TARGET_TYPE = uint8(0);
%-----
% YAW ANGLE REFERENCE TYPE
% / 0. NONE / 1. PULSE / 2. SQUARE / 3. PRBS
CONTROL.STATE.YA_TARGET_TYPE = uint8(0);
%-----
% WALL DISTANCE REFERENCE TYPE
% / 0. CONSTANT = 0.1 m / 1. PULSE / 2. SQUARE / 3. PRBS / 4. CURVE
CONTROL.STATE.WD_TARGET_TYPE = uint8(2);
%-----

%-----
%% FEEDFORWARD (MOTOR VOLTAGE DROP IN DIFFERENTIAL MODE)
%-----
% VOLTAGE DROP IN DIFFERENTIAL MOTOR VOLTAGE
% / 0. NOT ENABLED / 1. ENABLED
CONTROL.STATE.WFL_FEEDFORWARD = uint8(1);
%-----

%-----
%% DELAY IN MOTOR VOLTAGE
%-----
% MOTOR DELAY MODE
% / 0. WITHOUT DELAY / 1. SIMULATED DELAY / 2. ACTUAL DELAY
CONTROL.STATE.MOTOR_DELAY_MODE = uint8(0);
%-----
% SMITH PREDICTOR FOR FORWARD-VELOCITY AND YAW-RATE CONTROL
% / 0. DESIGN WITH DELAY / 1. SMITH PREDICTOR / 2. DESIGN WITHOUT DELAY
CONTROL.STATE.SP_MODE = uint8([0 0]);
%-----
```

2. El diseño del control por realimentación de estado se realiza mediante el fichero /SOFTWARE\_COMPONENTS / CONTROL / CONFIG\_CONTROL.m. Este fichero ya está preparado para el diseño de un regulador por realimentación de estado con el fin de mantener la distancia en el valor constante deseado. Únicamente hay que definir el método de diseño y las especificaciones en la sección WALL FOLLOWER SFR: SPECIFICATIONS (los valores que se muestran para las especificaciones son los valores por defecto). En realidad, se definen 4 diseños diferentes correspondientes a los 4 puntos de operación asignados a distintos valores de la velocidad de avance. En esta práctica sólo se van a modificar las especificaciones de diseño correspondientes al primer punto de operación.

```
%-----
%% WALL FOLLOWER: STATE FEEDBACK REGULATOR
%-----
% WALL FOLLOWER SFR: SPECIFICATIONS
% Design method
% 1. Pole placement / 2. LQR
WFL_SFC.design_method = 1;
% Closed-loop wn / Open-loop wn
WFL_SFC.natural_freq = [5 5 5 5];
% Damping factor
WFL_SFC.damping_factor = [0.99 0.99 0.99 0.99];
% Third pole module / closed-loop wn
WFL_SFC.p_factor = [5 5 5 5];
% LQR state weighting matrix
WFL_SFC.matQ = [5e-4 5e-4 1 ; 5e-4 5e-4 1 ; 5e-4 5e-4 1 ; 5e-4 5e-4 1];
% LQR MV weighting matrix
WFL_SFC.matR = [0.5e-3 ; 0.5e-3 ; 0.5e-3 ; 0.5e-3];
%-----
```

3. En primer lugar, se diseña el regulador mediante asignación de polos. Para ello, primero hay que definir la variable `WFL_SFC.design_method = 1`. Los dos polos dominantes en lazo cerrado se definen en las variables `WFL_SFC.natural_freq` (pulsación natural) y `WFL_SFC.damping_factor` (factor de amortiguamiento). La relación entre la magnitud del tercer polo real y la pulsación natural de los polos dominantes del control se define mediante la variable `WFL_SFC.p_factor`.

### **Simulación del regulador por realimentación de estado mediante asignación de polos**

1. Seguir las instrucciones incluidas en la “Guía de usuario del coche” para simular la respuesta del regulador a cambios de referencia de distancia o al trazado de una curva. El tipo de perturbación se selecciona en la variable `CONTROL.STATE.WD_TARGET_TYPE` (sección REFERENCE DEFINITION en **CONFIG\_CONTROL.m**). En el caso de simular una onda cuadrada en la referencia de distancia, se aplica una onda entre 0.075 m y 0.1 m y 10 s de período.
2. Repetir el diseño y la simulación iterativamente, cambiando la ubicación de los polos del sistema en lazo cerrado, hasta conseguir la mejor respuesta posible.

### **Diseño de un regulador por realimentación de estado LQR**

Para diseñar el regulador LQR, primero hay que definir la variable `WFL_SFC.design_method = 2`. Los pesos de las matrices Q y R se definen en las variables `WFL_SFC.matQ` y `WFL_SFC.matR`, respectivamente.

### **Simulación del regulador por realimentación de estado LQR**

1. Seguir las instrucciones incluidas en la “Guía de usuario del coche” para simular la respuesta del regulador a cambios de referencia de distancia o al trazado de una curva.
2. Repetir el diseño y la simulación iterativamente, cambiando las matrices de peso, hasta conseguir la mejor respuesta posible.

## ***Trabajo de laboratorio***

### **Ensayo con el regulador diseñado mediante asignación de polos**

1. El ensayo a realizar consiste en la aplicación de una onda cuadrada en la referencia de distancia entre 0.075 m y 0.1 m y 10 s de período.
2. Configurar el fichero **CONFIG\_CONTROL.m** para el diseño del regulador por realimentación de estado mediante asignación de polos, según los resultados obtenidos durante el trabajo previo.
3. Verificar mediante simulación que la configuración es la correcta.
4. Seguir las instrucciones incluidas en la “Guía de usuario del coche” para la realización del ensayo. Se deben guardar los datos del ensayo en un fichero `.mat`.

### **Comparación de simulación y ensayo para el regulador por asignación de polos**

Seguir las instrucciones incluidas en la “Guía de usuario del coche” para la comparación de la simulación y el ensayo. Guardar la gráfica generada con la comparación de las variables más relevantes.

### **Ensayo con el regulador LQR**

1. Configurar el fichero **CONFIG\_CONTROL.m** para el diseño del regulador por realimentación de estado LQR, según los resultados obtenidos durante el trabajo previo.
2. Verificar mediante simulación que la configuración es la correcta.
3. Seguir las instrucciones incluidas en la “Guía de usuario del coche” para la realización del ensayo. Se deben guardar los datos del ensayo en un fichero .mat.

### **Comparación de simulación y ensayo para el regulador LQR**

Seguir las instrucciones incluidas en la “Guía de usuario del coche” para la comparación de la simulación y el ensayo. Guardar la gráfica generada con la comparación de las variables más relevantes.

### **Ensayo final en el circuito y aplicación del filtro EKF**

1. Utilizando sólo el mejor control de los dos anteriores, comprobar las prestaciones del mejor control de distancia por realimentación de estado en el seguimiento de la pared del circuito con referencia de distancia a la pared constante e igual a 0.1 m, especialmente en las curvas. Registrar en el ensayo las principales variables (velocidad de avance y su referencia, distancia a la pared y su referencia, ángulo de orientación y su referencia y tensiones de los motores) en los ensayos de seguimiento de pared para ambos controles y dos referencias de velocidad de avance diferentes (0.2 m/s y 0.4 m/s), sin modificar el diseño del control.
2. Seguir las instrucciones incluidas en la “Guía de usuario del coche” para la realización del ensayo. Se deben guardar los datos del ensayo en un fichero .mat.
3. Sustituir la medida directa y filtrada de las variables de estado por su estimación usando un filtro EKF. Para ello, acceder previamente al fichero **CONFIG\_CONTROL.m** para definir:

```
%-----  
%% MEASUREMENT FILTERING AND STATE ESTIMATION  
%-----  
% OBSERVER MODE  
% / 0. FILTERED MEASUREMENT / 1. EKF  
CONTROL.STATE.OBSERVER_MODE = uint8(1);  
%-----
```

4. Repetir los pasos 1 y 2 aplicando el filtro EKF para la estimación de las variables de estado del control.

### ***Trabajo posterior***

Redactar un breve informe que debe incluir lo siguiente:

- Gráficas con la comparación de la simulación y el ensayo del regulador por realimentación de estado por asignación de polos y LQR para el seguimiento de pared con escalones en la referencia de distancia.
- Gráficas con las principales señales registradas (velocidad de avance y su referencia, distancia a la pared y su referencia, ángulo de orientación, velocidad de giro y tensiones de los motores) en los ensayos de seguimiento de pared en el circuito para dos referencias diferentes de velocidad de avance (0.2 m/s y 0.4 m/s).
- Las gráficas del punto anterior deben representarse tanto para medida directa de todas las variables de estado como para el caso de estimación de las variables de estado mediante un filtro EKF.
- Conclusiones de la sesión práctica.

Se valorará especialmente la inclusión de comentarios originales que resalten aspectos interesantes de los gráficos presentados.

## 7. Sesión 5: Control adaptativo

Un control adaptativo es el que puede modificar el valor de sus parámetros frente a cambios en la dinámica del proceso controlado o en las características de las perturbaciones que le afectan. En esta sesión se aplicará el control adaptativo en dos circunstancias diferentes:

- Control adaptativo de la distancia a la pared debido al cambio de la velocidad de avance.
- Control adaptativo de la velocidad del vehículo con cambios en la constante de tiempo  $T_f$  de filtrado de la medida.

En el primer caso, los cambios no tienen incertidumbre ya que se pueden detectar midiendo la velocidad de avance del vehículo. La estrategia más apropiada en este caso es un control adaptativo mediante programación de ganancia o *Gain Scheduling* (ver figura 9). Como en cualquier otra estrategia de control adaptativo, el sistema de control consta de dos lazos: el lazo interno de realimentación convencional y el lazo externo que ajusta los parámetros del control al cambiar las condiciones de operación a partir de una función o de una tabla de búsqueda.

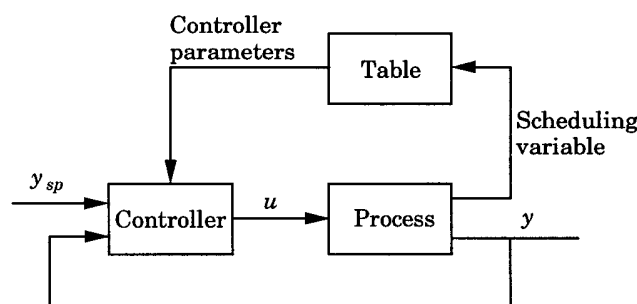


Figura 9: Diagrama de bloques de un control por programación de ganancia

Para la implantación del control adaptativo por programación de ganancia en el seguimiento de la pared se empleará un regulador LQR por realimentación de estado y estimador EKF. En primer lugar, se diseñará este control para diferentes velocidades de

avance. Durante el funcionamiento normal, se determinará la matriz de ganancias que se usará en cada momento en función de la referencia de velocidad de avance aplicada.

En el segundo caso, se supone que los cambios en la constante de tiempo  $T_f$  son imprevisibles y sólo se puede detectar su efecto sobre la respuesta del sistema en lazo cerrado. Por lo tanto, la estrategia más apropiada en este caso es un control adaptativo STR o *Self-Tuning Regulator* (ver figura 10). El lazo externo estima en tiempo real y de forma recursiva los parámetros de la planta y calcula los parámetros del control a partir del método de diseño seleccionado. A veces, se requiere perturbar la variable de control o mando para estimar con suficiente precisión los parámetros del proceso. Si se dispone de una medida de la incertidumbre en la estimación de los parámetros, puede emplearse para condicionar el diseño del control, seleccionando un control más conservador cuando dicha incertidumbre es elevada.

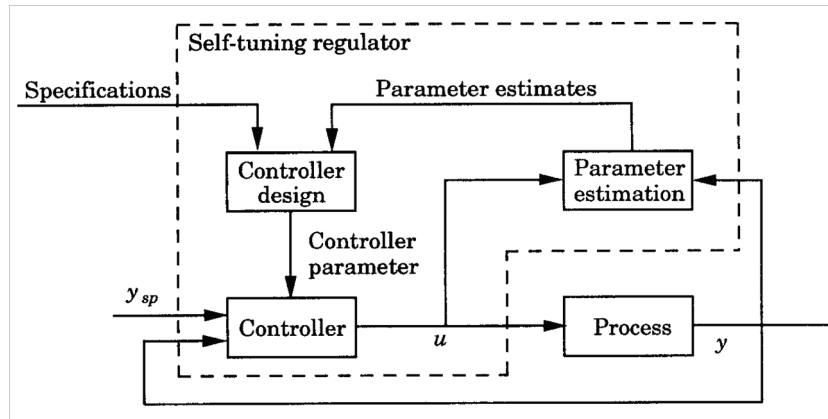


Figura 10: Diagrama de bloques de un regulador autoajustable

El control adaptativo STR se aplicará a un control PI de la velocidad de avance del vehículo con medida directa basada en un filtro paso bajo de primer orden y constante de tiempo  $T_f$ . Precisamente, se modificará artificialmente la constante de tiempo  $T_f$  del filtro para provocar variaciones en la respuesta temporal del sistema de control. Para implantar el control adaptativo STR se requiere previamente identificar los parámetros de la planta. Se utilizará un modelo de regresión lineal en tiempo continuo para estimar los coeficientes de la función de transferencia de segundo orden sin cero correspondiente a la planta:

$$P(s) = \frac{K_m}{(1 + T_m s)(1 + T_f s)} = \frac{b_0}{a_2 s^2 + a_1 s + 1} = \frac{b_0 \frac{1}{s}}{a_2 s + a_1 + \frac{1}{s}}$$

La función de transferencia de la planta se divide por  $s$  para evitar el cálculo de la segunda derivada de la salida como regresor, ya que resulta bastante ruidoso. La ecuación diferencial que permite definir el modelo de regresión lineal que se usará para estimar los coeficientes de la función de transferencia es la siguiente:

$$\int y dt = -a_2 \frac{dy}{dt} - a_1 y + b_0 \int u dt$$

Los regresores  $-\frac{dy}{dt}$ ,  $-y$  y  $\int u dt$  y la salida del modelo de regresión lineal  $\int y dt$  se calculan usando un filtro paso banda en variables de estado.

Una vez estimados los coeficientes de la función de transferencia de la planta  $b_0$ ,  $a_1$  y  $a_2$ , las ecuaciones de diseño en tiempo real del control PI con ponderación de la referencia son muy sencillas. La función de transferencia de lazo cerrado puede escribirse de dos formas diferentes, o bien en función de los coeficientes de la planta y de los parámetros del control PI o bien en función de los polos del sistema en lazo cerrado:

$$F(s) = \frac{\frac{b_0 K}{a_2 T_i} (1 + b T_i s)}{s^3 + \frac{a_1}{a_2} s^2 + \frac{1 + K b_0}{a_2} s + \frac{b_0 K}{a_2 T_i}} = \frac{\frac{\omega_n^2}{\tau} (1 + b T_i s)}{s^3 + \left(2\zeta\omega_n + \frac{1}{\tau}\right) s^2 + \left(\omega_n^2 + \frac{2\zeta\omega_n}{\tau}\right) s + \frac{\omega_n^2}{\tau}}$$

Fijando la pulsación natural  $\omega_n$  y el factor de amortiguamiento  $\zeta$  de los polos dominantes en lazo cerrado, se pueden calcular todos los parámetros del control a partir de los parámetros estimados de la planta:

$$\tau = \frac{a_2}{a_1 - 2a_2\zeta\omega_n} \quad K = \frac{a_2\omega_n^2 + \frac{2a_2\zeta\omega_n}{\tau} - 1}{b_0} \quad T_i = \frac{b_0 K \tau}{a_2 \omega_n^2} \quad b = \frac{\tau}{T_i}$$

Para que el control adaptativo STR funcione adecuadamente deben tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

- La actualización de los parámetros del control debe realizarse de forma mucho más lenta que la dinámica dominante en lazo cerrado.
- Debe excitarse de forma persistente la planta para estimar con precisión los parámetros de la misma.
- Las especificaciones del sistema de control en lazo cerrado deben ser realistas.

### ***Trabajo previo***

Revisar toda la teoría incluida en los apuntes relativa al control adaptativo.

### **Simulación del control de seguimiento de pared al cambiar la velocidad de avance**

1. En la carpeta /SOFTWARE\_COMPONENTS / CONTROL, acceder al fichero **CONFIG\_CONTROL.m** para definir la configuración adecuada del sistema de control: navegación mediante seguimiento de pared, sin retardo en la planta real, aplicando un control LQR por realimentación de estado, prealimentación activada, estimación del estado mediante EKF, la opción *Gain Scheduling* desactivada y aplicación de una onda cuadrada en la referencia de distancia a la pared y de una rampa en la referencia de velocidad del vehículo.

```
%-----
%% CONTROL MODE
%-----
% / 0. OPEN LOOP / 1. FORWARD VELOCITY AND YAW ANGLE /
% / 2. FORWARD VELOCITY AND YAW RATE / 3. NAVIGATION /
% / 4. WALL FOLLOWER / 5. WALL_FOLLOWING COMPETITION /
% / 6. NAVIGATION COMPETITION / 7. FORWARD VELOCITY COMPETITION /
CONTROL.STATE.CONTROL_MODE = uint8(4);

%-----
%% CONTROL TYPES
%-----
% FORWARD VELOCITY CONTROL TYPE
% / 0. PID / 1. STATE FEEDBACK CONTROL
CONTROL.STATE.FORWARD_VEL_CONTROL_TYPE = uint8(0);
%-----
% YAW RATE CONTROL TYPE
```

```
% / 0. PID / 1. STATE FEEDBACK CONTROL
CONTROL.STATE.YAW_RATE_CONTROL_TYPE = uint8(0);
%-----
% YAW ANGLE CONTROL TYPE
% / 0. PID / 1. STATE FEEDBACK CONTROL
CONTROL.STATE.YAW_ANG_CONTROL_TYPE = uint8(0);
%-----
% WALL FOLLOWER CONTROL TYPE
% / 0. SINGLE LOOP / 1. CASCADE / 2. STATE FEEDBACK CONTROL
CONTROL.STATE.WFL_CONTROL_TYPE = uint8(2);
%-----

%-----
%% REFERENCE DEFINITION
%-----
% FORWARD VELOCITY REFERENCE TYPE
% / 0. CONSTANT / 1. PULSE / 2. SQUARE / 3. PRBS / 4. RAMP
CONTROL.STATE.FV_TARGET_TYPE = uint8(4);
%-----
% YAW RATE REFERENCE TYPE
% / 0. NONE / 1. PULSE / 2. SQUARE / 3. PRBS
CONTROL.STATE.YR_TARGET_TYPE = uint8(0);
%-----
% YAW ANGLE REFERENCE TYPE
% / 0. NONE / 1. PULSE / 2. SQUARE / 3. PRBS
CONTROL.STATE.YA_TARGET_TYPE = uint8(0);
%-----
% WALL DISTANCE REFERENCE TYPE
% / 0. CONSTANT = 0.1 m / 1. PULSE / 2. SQUARE / 3. PRBS / 4. CURVE
CONTROL.STATE.WD_TARGET_TYPE = uint8(2);
%-----

%-----
%% FEEDFORWARD (MOTOR VOLTAGE DROP IN DIFFERENTIAL MODE)
%-----
% VOLTAGE DROP IN DIFFERENTIAL MOTOR VOLTAGE
% / 0. NOT ENABLED / 1. ENABLED
CONTROL.STATE.WFL_FEEDFORWARD = uint8(1);
%-----

%-----
%% DELAY IN MOTOR VOLTAGE
%-----
% MOTOR DELAY MODE
% / 0. WITHOUT DELAY / 1. SIMULATED DELAY / 2. ACTUAL DELAY
CONTROL.STATE.MOTOR_DELAY_MODE = uint8(0);
%-----
% SMITH PREDICTOR FOR FORWARD-VELOCITY AND YAW-RATE CONTROL
% / 0. DESIGN WITH DELAY / 1. SMITH PREDICTOR / 2. DESIGN WITHOUT DELAY
CONTROL.STATE.SP_MODE = uint8([0 0]);
%-----

%-----
%% ADAPTIVE CONTROL
%-----
% GAIN SCHEDULING (WALL FOLLOWER)
% / 0. NOT ENABLED / 1. ENABLED
CONTROL.STATE.GAIN_SCHEDULING = uint8(0);
%-----
% FILTER TIME CONSTANT CHANGE
% / 0. NOT ENABLED / 1. ENABLED
CONTROL.STATE.FILTER_CHANGE = uint8(0);
%-----
% SELF-TUNING FORWARD-VELOCITY CONTROL
% / 0. NOT ENABLED / 1. ENABLED
CONTROL.STATE.STR_MODE = uint8(0);
%-----
```

2. Para diseñar el regulador LQR, primero hay que definir la variable `WFL_SFC.design_method = 2`. Los pesos de las matrices Q y R se definen en



las variables `WFL_SFC.matQ` y `WFL_SFC.matR`, respectivamente. Se pueden utilizar matrices de peso diferentes para cada punto de operación. Si la programación de ganancias no está activada, se usa el diseño realizado para el punto de operación definido en la variable `CONTROL.STATE.FORWARD_VEL_MAIN_OP`.

```
%-----
%% WALL FOLLOWER: STATE FEEDBACK REGULATOR
%-----
% WALL FOLLOWER SFR: SPECIFICATIONS
% Design method
% 1. Pole placement / 2. LQR
WFL_SFC.design_method = 2;
% Closed-loop wn / Open-loop wn
WFL_SFC.natural_freq = [5 5 5 5];
% Damping factor
WFL_SFC.damping_factor = [0.99 0.99 0.99 0.99];
% Third pole module / closed-loop wn
WFL_SFC.p_factor = [5 5 5 5];
% LQR state weighting matrix
WFL_SFC.matQ = [5e-4 5e-4 1 ; 5e-4 5e-4 1 ; 5e-4 5e-4 1];
% LQR MV weighting matrix
WFL_SFC.matR = [0.5e-3 ; 0.5e-3 ; 0.5e-3 ; 0.5e-3];
%-----
```

- Seguir las instrucciones incluidas en la “Guía de usuario del coche” para simular la respuesta del control a cambios de referencia de distancia. Durante la simulación se aplicará un tren de escalones en la referencia de distancia a la pared entre 0.075 m y 0.1 m y 10 s de período. Simultáneamente, se aplican rampas lentas de subida y bajada a la referencia de velocidad del vehículo entre 0.2 m/s y 0.5 m/s, con saltos de 0.1 m/s cada 30 s.
- Acceder a la carpeta `/PLOT_FILES` y ejecutar el fichero `PLOT_SCOPE_SIM`. Al ejecutar este fichero, desactivar la selección de un intervalo, para que se guarde el registro completo en un fichero con el nombre y comentarios especificados en la cabecera del fichero.

### Simulación del control adaptativo por programación de ganancia

- Repítase la simulación anterior, activando previamente la opción *Gain Scheduling* en el fichero `CONFIG_CONTROL.m`. Con esta opción activada, se aplican un control LQR distinto para cada velocidad (0.2, 0.3, 0.4 y 0.5 m/s). Los controles se diseñan con especificaciones idénticas o diferentes, pero con distintos modelos linealizados, resultando diferentes matrices de ganancias. La matriz de ganancias aplicada en cada momento depende de la referencia de la velocidad de avance. Se recomienda utilizar las mismas especificaciones (matrices de peso Q y R) para todos los controles en la prueba inicial. El efecto debe ser una variación mucho menor de la respuesta temporal al cambiar la velocidad de avance del vehículo. Es decir, se consigue un control más robusto usando esta estrategia de control adaptativo.
- Ejecutar el fichero `CONFIG_CAR.m`, definiendo previamente `RUN_MODE = 2`.
- Ejecutar el fichero `SIMULINK / CAR_CONTROL_SYSTEM.slx`.
- Comparar las respuestas temporales sin programación de ganancias o con esa opción activada. Dicha comparación puede observarse en el osciloscopio `/MONITORIZATION / TEST: SCOPES`.

5. Repetir las simulaciones anteriores, con programación de ganancia activada y desactivada, cuando el vehículo entra en una curva a distintas velocidades. Para activar la simulación de la curva, modificar la siguiente opción el fichero **CONFIG\_CONTROL.m**.

```
%-----
%% REFERENCE DEFINITION
%-----
...
%-----
% WALL DISTANCE REFERENCE TYPE
% / 0. CONSTANT = 0.1 m / 1. PULSE / 2. SQUARE / 3. PRBS / 4. CURVE
CONTROL.STATE.WD_TARGET_TYPE = uint8(4);
%-----
```

### Simulación del control de velocidad de avance ante cambios en la planta

1. En la carpeta /SOFTWARE\_COMPONENTS/CONTROL, acceder al fichero **CONFIG\_CONTROL.m** para definir la configuración adecuada del sistema de control: control PID de las velocidades de avance y giro, sin retardo en la planta real, con medida directa de las variables de estado, variación aplicada en la constante de tiempo del filtrado, sin adaptación del control y aplicación de una onda cuadrada en la referencia de velocidad de avance.

```
%-----
%% CONTROL MODE
%-----
% / 0. OPEN LOOP / 1. FORWARD VELOCITY AND YAW ANGLE /
% / 2. FORWARD VELOCITY AND YAW RATE / 3. NAVIGATION /
% / 4. WALL FOLLOWER / 5. WALL_FOLLOWING COMPETITION /
% / 6. NAVIGATION COMPETITION / 7. FORWARD VELOCITY COMPETITION /
CONTROL.STATE.CONTROL_MODE = uint8(2);

%-----
%% CONTROL TYPES
%-----
% FORWARD VELOCITY CONTROL TYPE
% / 0. PID / 1. STATE FEEDBACK CONTROL
CONTROL.STATE.FORWARD_VEL_CONTROL_TYPE = uint8(0);
%-----
% YAW RATE CONTROL TYPE
% / 0. PID / 1. STATE FEEDBACK CONTROL
CONTROL.STATE.YAW_RATE_CONTROL_TYPE = uint8(0);
%-----
% YAW ANGLE CONTROL TYPE
% / 0. PID / 1. STATE FEEDBACK CONTROL
CONTROL.STATE.YAW_ANG_CONTROL_TYPE = uint8(0);
%-----
% WALL FOLLOWER CONTROL TYPE
% / 0. SINGLE LOOP / 1. CASCADE / 2. STATE FEEDBACK CONTROL
CONTROL.STATE.WFL_CONTROL_TYPE = uint8(2);
%-----

%-----
%% REFERENCE DEFINITION
%-----
% FORWARD VELOCITY REFERENCE TYPE
% / 0. CONSTANT / 1. PULSE / 2. SQUARE / 3. PRBS / 4. RAMP
CONTROL.STATE.FV_TARGET_TYPE = uint8(2);
%-----
% YAW RATE REFERENCE TYPE
% / 0. NONE / 1. PULSE / 2. SQUARE / 3. PRBS
CONTROL.STATE.YR_TARGET_TYPE = uint8(0);
%-----
% YAW ANGLE REFERENCE TYPE
% / 0. NONE / 1. PULSE / 2. SQUARE / 3. PRBS
```

```
CONTROL.STATE.YA_TARGET_TYPE = uint8(0);
%-----
% WALL DISTANCE REFERENCE TYPE
% / 0. CONSTANT = 0.1 m / 1. PULSE / 2. SQUARE / 3. PRBS / 4. CURVE
CONTROL.STATE.WD_TARGET_TYPE = uint8(0);
%-----

%-----
%% DELAY IN MOTOR VOLTAGE
%-----
% MOTOR DELAY MODE
% / 0. WITHOUT DELAY / 1. SIMULATED DELAY / 2. ACTUAL DELAY
CONTROL.STATE.MOTOR_DELAY_MODE = uint8(0);
%-----
% SMITH PREDICTOR FOR FORWARD-VELOCITY AND YAW-RATE CONTROL
% / 0. DESIGN WITH DELAY / 1. SMITH PREDICTOR / 2. DESIGN WITHOUT DELAY
CONTROL.STATE.SP_MODE = uint8([0 0]);
%-----

%-----
%% ADAPTIVE CONTROL
%-----
% GAIN SCHEDULING (WALL FOLLOWER)
% / 0. NOT ENABLED / 1. ENABLED
CONTROL.STATE.GAIN_SCHEDULING = uint8(0);
%-----
% FILTER TIME CONSTANT CHANGE
% / 0. NOT ENABLED / 1. ENABLED
CONTROL.STATE.FILTER_CHANGE = uint8(1);
%-----
% SELF-TUNING FORWARD-VELOCITY CONTROL
% / 0. NOT ENABLED / 1. ENABLED
CONTROL.STATE.STR_MODE = uint8(0);
%-----
```

2. Diseñar un control PI por respuesta en frecuencia con las siguientes especificaciones:

```
%% FORWARD VELOCITY: PID CONTROL
%-----
% Control type
% / 1. Control P / 2. Control PI
% / 3. Control PD error / 4. Control PD output
% / 5. Control PID error / 6. Control PID output
FWD_VEL_PID.control_type = 2;
if CONTROL.STATE.PID_DESIGN_METHOD == 0 % Frequency response
    % Phase margin (deg)
    FWD_VEL_PID.phase_margin_deg = 70;
    % Gain margin (dB)
    FWD_VEL_PID.gain_margin_dB = 0;
    % Design frequency (rad/s): k = w_d/w_d_P
    FWD_VEL_PID.k_wd_P = 0.85;
    % Reference weight
    FWD_VEL_PID.b = 1.5;
    % Lag phase of the integral action (deg)
    FWD_VEL_PID.lag_phase_deg = -10;
    % Filtering factor of the derivative action
    FWD_VEL_PID.f = 0.1;
    ...
end
```

3. El control anterior no es un control óptimo y es sólo un ajuste inicial para comprobar cómo el control adaptativo, si se activa, puede mejorar automáticamente la respuesta inicial.
4. Ejecutar /SIMULINK / CONFIG\_CAR.m, definiendo previamente RUN\_MODE = 1.
5. La constante de tiempo del filtro medida se modifica mediante una onda cuadrada entre 0.05 s y 0.1 s y período igual a 80 s.

6. Seguir las instrucciones incluidas en la “Guía de usuario del coche” para simular la respuesta del sistema.
7. Acceder a la carpeta **/PLOT\_FILES** y ejecutar el fichero **PLOT\_SCOPE\_SIM**. Al ejecutar este fichero, desactivar la selección de un intervalo, para que se guarde el registro completo en un fichero con el nombre y comentarios especificados en la cabecera del fichero.

### **Simulación del control adaptativo STR**

1. Repítase la simulación anterior, activando previamente el modo STR en el fichero **CONFIG\_CONTROL.m** (`CONTROL.STATE.STR_MODE = uint8(1)`). Con esta opción activada, se identifica el modelo de la planta y se emplea para actualizar el control PI en tiempo real. Las especificaciones por defecto son una pulsación natural igual a 10 rad/s, un factor de amortiguamiento igual a 0.7 y la ponderación de referencia necesaria para que la función de transferencia de lazo cerrado sea de segundo orden ideal mediante la cancelación de un cero con un polo.
2. Ejecutar el fichero **CONFIG\_CAR.m**, definiendo previamente `RUN_MODE = 2`.
3. Ejecutar el fichero **/SIMULINK / CAR\_CONTROL\_SYSTEM.slx**.
4. Comparar las respuestas temporales con adaptación del control o sin ella. Dicha comparación puede observarse en el osciloscopio **/MONITORIZATION / TEST: SCOPES**.
5. Comprobar en simulación qué ocurre si se realiza un diseño más rápido incrementado el valor de la pulsación natural a 20 rad/s en el bloque **/ADAPTIVE CONTROL STR / PI DESIGN**.

### ***Trabajo de laboratorio***

Los pasos a seguir durante la sesión de laboratorio son los siguientes:

### **Ensayo en el circuito del control adaptativo por programación de ganancia**

1. Comprobar el funcionamiento del control adaptativo por programación de ganancias (*Gain Scheduling*) durante un ensayo de seguimiento de la pared en el circuito con una rampa en la referencia de velocidad entre 0.2 m/s y 0.5 m/s con saltos de 0.1 m/s. Realizar estos ensayos con la opción *Gain Scheduling* primero desactivada y luego activada para apreciar las diferencias. Hay que registrar todas las señales de interés durante los ensayos.

### **Ensayo del control adaptativo STR**

1. Comprobar mediante un ensayo de control de la velocidad de avance del vehículo las prestaciones del control adaptativo STR. La variación de la constante de tiempo del filtro del *encoder* se genera localmente si se activa dicha opción en el fichero **CONFIG\_CONTROL.m**. La adaptación de los parámetros del control también puede activarse o desactivarse en el mismo fichero. Hay que registrar todas las señales de interés durante los dos ensayos: con el control adaptativo desactivado y con el control adaptativo activado.

2. Puede realizarse el ensayo de dos formas distintas para garantizar una duración suficiente del mismo:
  - Utilizando el modo de navegación por seguimiento de pared para que el vehículo dé vueltas continuamente en el circuito durante todo el ensayo mientras que se aplican los escalones en la referencia de velocidad.
  - Usando una emisora de radiocontrol para controlar el giro del vehículo y alargar así la duración del ensayo evitando que el vehículo colisione con los obstáculos que encuentre en su recorrido.

### ***Trabajo posterior***

Redactar un breve informe que debe incluir lo siguiente:

- Gráficas del ensayo del control adaptativo *Gain Scheduling* aplicado al control de navegación mediante seguimiento de la pared con el control adaptativo desactivado y activado.
- Gráficas del ensayo del control adaptativo STR aplicado al control de velocidad de avance cuando cambia la constante de tiempo del filtro paso bajo del *encoder* magnético con el control adaptativo desactivado y activado
- Conclusiones de la sesión práctica.

Se valorará especialmente la inclusión de comentarios originales que resalten aspectos interesantes de los gráficos presentados.

## **8. Sesión 6: Competición**

En esta sesión se realiza una competición entre los diferentes grupos donde el objetivo es diseñar un control de seguimiento de pared para recorrer el circuito en el menor tiempo posible. Las normas de la competición son las siguientes:

- Pueden emplearse cualquiera de las técnicas de control que se han explorado durante las sesiones previas, tanto para el control de la velocidad de avance como para el control de seguimiento de pared.
- La velocidad del vehículo debe estar limitada a 0.5 m/s en todo el recorrido. Si la medida de la velocidad, incluyendo el ruido de medida, sobrepasa ese límite en algún punto del recorrido, el tiempo realizado no se computará para la clasificación final de la competición.
- Para que la vuelta se considere válida, el trazado debe realizarse por el interior de todas las puertas que marcan el recorrido sin derribar ninguna de ellas.
- Estará disponible una emisora para modificar manualmente las referencias de velocidad y/o distancia durante el recorrido, si se considera oportuno.
- Ganará la competición el grupo que consiga invertir menos tiempo en completar una vuelta al circuito, sin límite de intentos y respetando las restricciones anteriormente establecidas.