

Guión de prácticas: Motor de corriente continua

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de esta práctica se compone de dos partes. En la primera se trabajará en *modo simulación* y en la segunda en *modo remoto*.

Para la realización de la práctica en modo simulación se tendrán que desarrollar los apartados descritos en la sección de Experimentos (sección 6 del presente documento). Una vez cumplimentados **todos** los apartados en modo simulación se procederá a la realización de la práctica en modo remoto (ver el Manual para la conexión con la planta).

El alumno deberá contrastar los resultados obtenidos en modo simulación con los resultados obtenidos en modo remoto.

Nota: Todos los apartados de la sección de Experimentos se tendrán que realizar tanto en modo simulación como en modo remoto. Si existe algún apartado que sólo procede realizarlo en un determinado modo (simulación o remoto), éste se indicará mediante una etiqueta de color rojo en el enunciado de dicho apartado.

1. OBJETIVOS DE LA PRÁCTICA

Los objetivos de esta práctica son los siguientes:

- Estudio de las características dinámicas del sistema.
- Estudio y diseño de un sistema de control de velocidad utilizando controladores PID.
- Estudio y diseño de un sistema de control de posición utilizando controladores PID.
- Empleo de determinadas funcionalidades del e-Journal: salvar registros, exportar registros, crear notas, ...

Por ello el documento está estructurado de la siguiente manera: primeramente se realiza una descripción del sistema. A continuación se presenta el modelo dinámico del sistema. Posteriormente se describen las estrategias de control de velocidad y control de posición que se van a utilizar. Por último en el cuarto apartado se incluyen los diferentes experimentos a realizar.

Para llevar a cabo la práctica es conveniente leer detenidamente todos los apartados e ir realizando todas aquellas tareas que se proponen. Al finalizar las experiencias en modo simulación deberá enviar un informe al profesor con las experiencias realizadas en el que deben incluirse las tareas teóricas. Después de la realización de la experiencia en modo remoto deberá enviar otro informe con dichas tareas.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema del motor de corriente continua que se ha utilizado como modelo para el desarrollo del laboratorio virtual y remoto ha sido desarrollado en la Escuela Politécnica Federal de Laussane, en Suiza (ver la Figura 1).

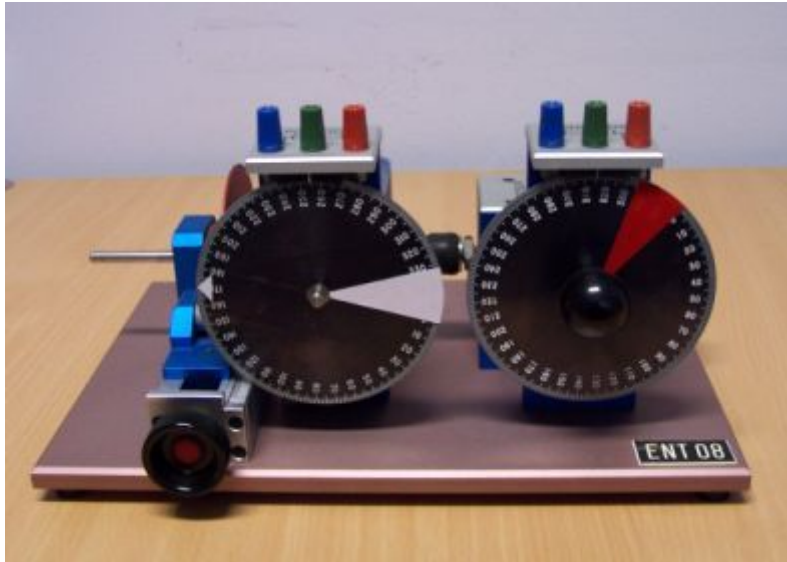


Fig. 1. El Motor de Corriente Continua

El sistema consta de un motor con un tacómetro empotrado. El motor impulsa un disco de acero como carga. Un freno magnético ajustable aplica un efecto de fricción viscosa, permitiendo por tanto la modificación de la constante de tiempo. La posición angular y la velocidad angular se controlan ajustando el voltaje aplicado al motor. La posición se mide con un potenciómetro conectado al eje del motor. El sistema incluye una cámara de video conectada por fireware para poder visualizar el funcionamiento del motor.

3. EL MODELO MATEMÁTICO

El motor de corriente continua más utilizado es aquel motor que tiene campos excitados por separado, por un lado "el inducido" (llamado "armadura" por algunos autores) y por otro lado "la excitación" (llamado "campo" por otros autores), véase la Figura 2(a). La Figura 2(b) muestra el esquema electromecánico de un motor de este tipo.

El inducido se ha modelado como un circuito eléctrico con una resistencia R_a en serie con una inductancia L_a , y una fuente de tensión $e_b(t)$ que representa la fuerza contraelectromotriz generada en el inducido por el giro del rotor. La excitación se ha representado como una resistencia R_f en serie con una inductancia L_f .

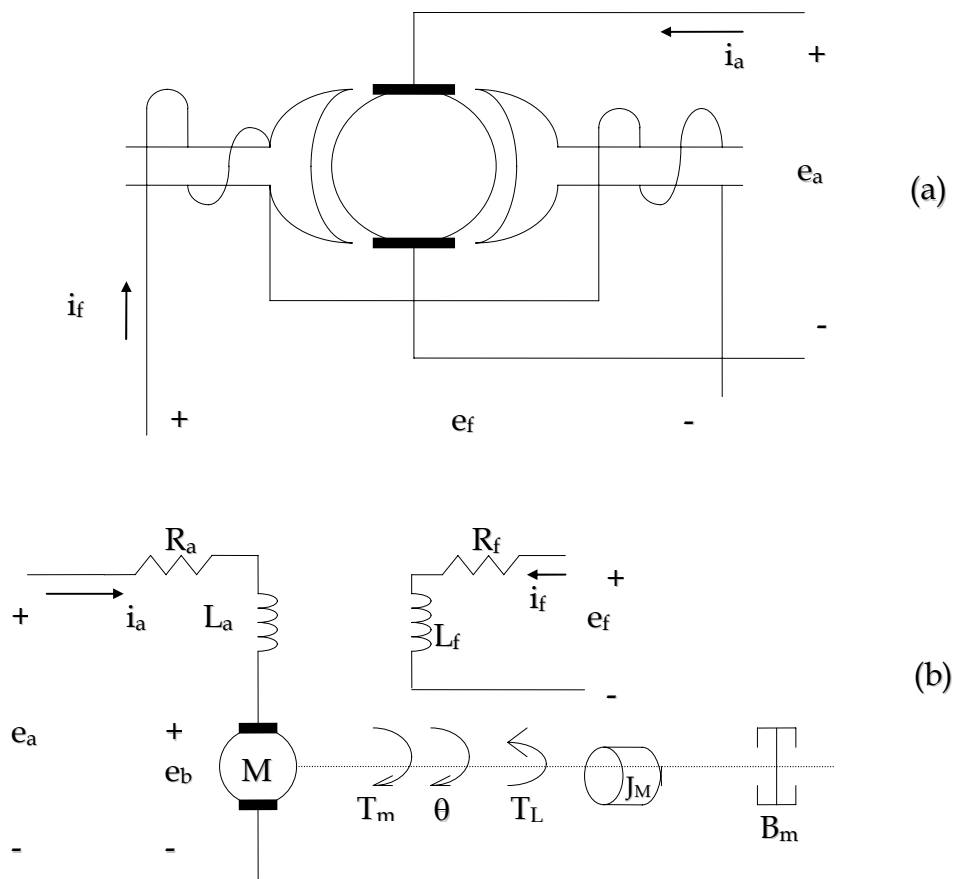


Fig. 2. (a) Esquema de un motor de corriente continua con dos campos excitados por separado. (b) Modelo electromecánico.

A continuación se da una lista de variables y constantes que se van a utilizar.

$e_a(t)$	tensión aplicada al inducido	$i_f(t)$	corriente en la excitación
$e_f(t)$	tensión aplicada a la excitación	$\phi(t)$	flujo magnético
$e_b(t)$	fuerza contraelectromotriz	$T_m(t)$	par desarrollado por el motor
R_a	resistencia del inducido	K_f, K_m, K_b	constantes
R_f	resistencia de la excitación	$\theta(t)$	desplazamiento angular del eje del motor
L_a	inductancia del inducido	$T_L(t)$	par de carga
L_f	inductancia de la excitación	B_m	coeficientes de fricción viscosa
$i_a(t)$	corriente en el inducido	J_m	momento de inercia del motor

De acuerdo con el esquema existen dos posibilidades para el control del motor. Control por inducido con la tensión $e_a(t)$ y control por excitación, con la tensión $e_f(t)$. Suponiendo que:

- a) El flujo magnético en el interior del motor es proporcional a la corriente en la excitación.

$$\phi(t) = K_f i_f(t) \quad (1)$$

- b) El par desarrollado por el motor es proporcional al flujo magnético y a la corriente en el inducido.

$$T_m(t) = K_m \phi(t) i_a(t) \quad (2)$$

En el control por inducido, e_a es variable y e_f se mantiene a un valor constante, por tanto $i_f(t)$ es constante, $\phi(t)$ es constante y de (1) y (2) se tiene que

$$T_m(t) = K_1 i_a(t) \quad (3)$$

Siendo $K_1 = K_m K_f$, e $i_f(t)$ una constante

Para un flujo $\phi(t)$ constante, la tensión inducida en la armadura es directamente proporcional a la velocidad angular. Así,

$$e_b(t) = K_b \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (4)$$

Para el circuito de inducido, se verifica la siguiente ecuación diferencial:

$$L_a \frac{di_a(t)}{dt} + R_a i_a(t) + e_b(t) = e_a(t) \quad (5)$$

Por lo que respecta a la conversión en energía mecánica. Una parte del par desarrollado por el eje del motor $T_m(t)$ se emplea en vencer: a) un cierto par de carga $T_L(t)$ y b) una cierta fricción entre los elementos mecánicos. La otra parte se transmite al eje como un par útil, producto del momento de inercia del motor J_m por la aceleración angular. Tal como se indica la expresión siguiente:

$$J_m \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + B_m \frac{d\theta(t)}{dt} + T_L(t) = T_m(t) \quad (6)$$

Sustituyendo (4) y (3) en (5) y (6) respectivamente se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones, que constituye un modelo lineal del motor de corriente continua controlado por inducido.

$$L_a \frac{di_a(t)}{dt} + K_b \frac{d\theta(t)}{dt} = -R_a i_a(t) + e_a(t) \quad (7)$$

$$J_m \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + B_m \frac{d\theta(t)}{dt} = K_1 i_a(t) - T_L(t) \quad (8)$$

Si se aplica la Transformada de Laplace a las ecuaciones (7) y (8) y se suponen condiciones iniciales nulas y que no existe par de carga $T_L(t)$. Se obtienen las ecuaciones siguientes:

$$L_a s I_a(s) + K_b s \theta(s) = -R_a I_a(s) + E_a(s) \quad (9)$$

$$J_m s^2 \theta(s) + B_m s \theta(s) = K_1 I_a(s) \quad (10)$$

Si se despeja $I_a(s)$ en la expresión (10) y se sustituye en (9), se determina la siguiente función de transferencia, donde se ha considerado $E_a(s)$ como la entrada y $\theta(s)$ como la salida del sistema.

$$\frac{\theta(s)}{E_a(s)} = \frac{K_1}{s(L_a J_m s^2 + (L_a B_m + R_a J_m)s + R_a B_m + K_1 K_b)} \quad (11)$$

La inductancia L_a de la armadura es, generalmente, pequeña y se puede despreciar. En ese caso la función de transferencia se reduce a:

$$\frac{\theta(s)}{E_a(s)} = \frac{K_m}{s(\tau s + 1)} \quad (12)$$

Siendo $K_m = \frac{K_1}{(R_a B_m + K_1 K_b)}$ y $\tau = \frac{R_a J_m}{(R_a B_m + K_1 K_b)}$

Si se considera $\omega(s)$ la salida del sistema, la función de transferencia que queda es la siguiente:

$$\frac{\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{K_m}{(\tau s + 1)} \quad (13)$$

Donde $\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt}$ representa la velocidad angular del motor.

El modelo experimental que se va a utilizar en el laboratorio se muestra en el siguiente esquema:

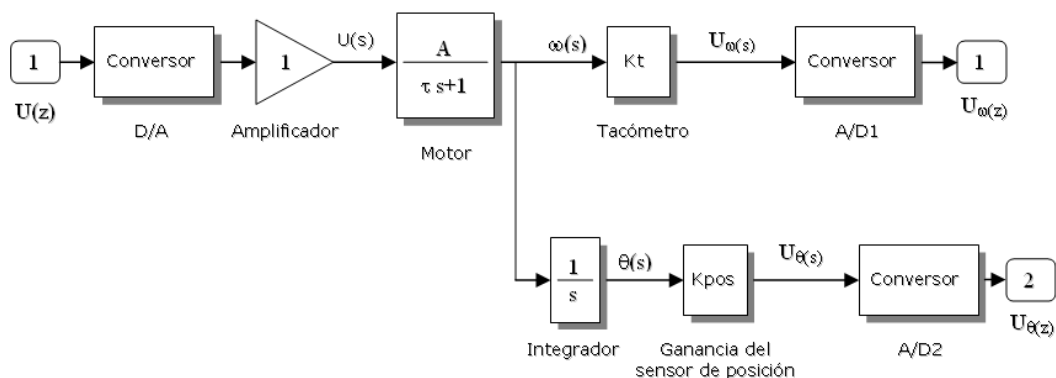


Fig. 3. Modelo experimental del motor de corriente continua para el laboratorio.

Donde la ganancia A y la constante de tiempo τ del motor se pueden determinar utilizando saltos de escalón en lazo abierto. Para ello es necesario aplicar entradas escalón a la entrada del motor y observar los cambios en la velocidad (salida del motor). El procedimiento que se debe seguir para la determinación de un modelo como el mostrado en la Figura 3 (Motor) está descrito en el Anexo 1.

Símbolo	Significado
A	Ganancia del motor
τ	Constante de tiempo del motor
K_t	Constante del tacómetro
K_{pos}	Ganancia del sensor de posición

4. CONTROL DE VELOCIDAD

El motor de corriente continua es bastante utilizado en procesos donde se requiere fijar una velocidad angular, por ejemplo en procesos de laminación. La Figura 4 muestra el esquema de un sistema típico de control de velocidad. El amplificador de potencia recibe una tensión continua U para excitar al inducido, siendo la salida del tacómetro una tensión proporcional a la velocidad angular ($U_w(s)$).

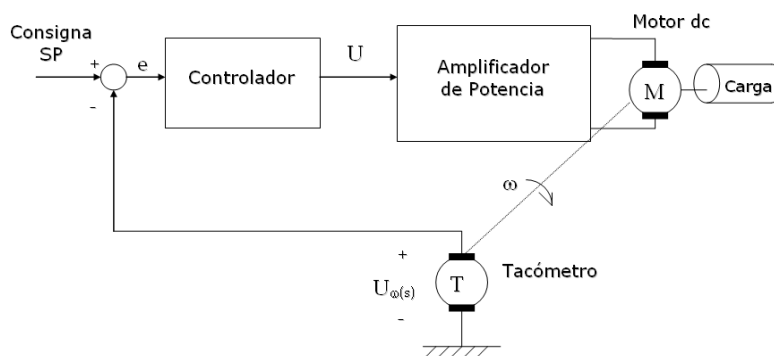


Fig. 4. Sistema típico de control de velocidad.

En la Figura 5 se muestra de forma esquemática el lazo de control para este proceso, donde C es el controlador utilizado.

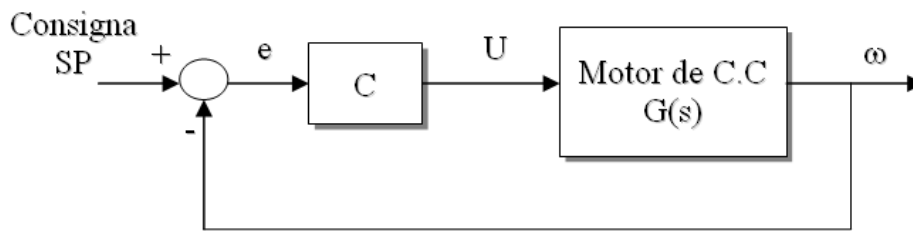


Fig. 5. Estrategia de control para el Motor de Corriente Continua.

En el laboratorio se permiten realizar dos tipos de control sobre el sistema:

Control manual. Este modo de operación servirá para estudiar la respuesta del sistema en lazo abierto y consistirá en controlar el sistema sin ninguna acción de control. Únicamente se irán aplicando los cambios que el usuario estime oportunos en cada momento para conseguir ajustarse a las consignas especificadas.

Control utilizando un controlador PID. En concreto se verá que con un PI es suficiente para controlar la velocidad del motor, aunque la configuración desarrollada por defecto daría opción de utilizar un controlador PID para llevar a cabo el control.

El controlador PI tiene la forma:

$$C(s) = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} \right] \quad (14)$$

Donde:

- K_p es la ganancia proporcional del controlador.
- T_i es el tiempo integral del controlador.

La estructura del sistema de control en lazo cerrado que se va a utilizar en este laboratorio se muestra en la Figura 6.

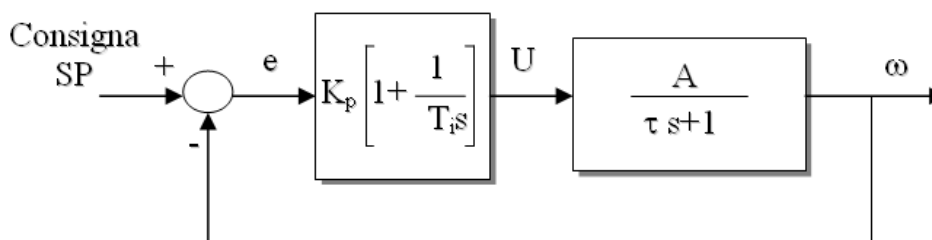


Fig. 6. Control PI para el Motor de Corriente Continua en el control de velocidad.

Como es sabido, si la elección de los parámetros del controlador es adecuada, el sistema es estable y no existirá error en el estado estacionario. Concretamente las raíces de la ecuación característica del sistema.

$$s^2 \tau + (1 + AK_p)s + AK_i = 0 \quad (15)$$

Donde $K_i = \frac{K_p}{T_i}$, son las responsables del carácter más o menos oscilatorio de la salida del tacómetro como respuesta a escalones en la tensión de referencia.

5. CONTROL DE POSICIÓN

El motor de corriente continua se utiliza también cuando se requiere fijar una posición angular. Por ejemplo, en una máquina de escribir o en una impresora con cabezal de tipo margarita, un motor es el encargado de posicionar el carácter correspondiente de la margarita antes de proceder a la impresión sobre el papel.

La Fig. 7 muestra el esquema de un sistema típico de control de posición con realimentación interna de velocidad, donde la salida del sensor de posición $U_\theta(s)$ es una tensión proporcional a la posición angular del eje del motor.

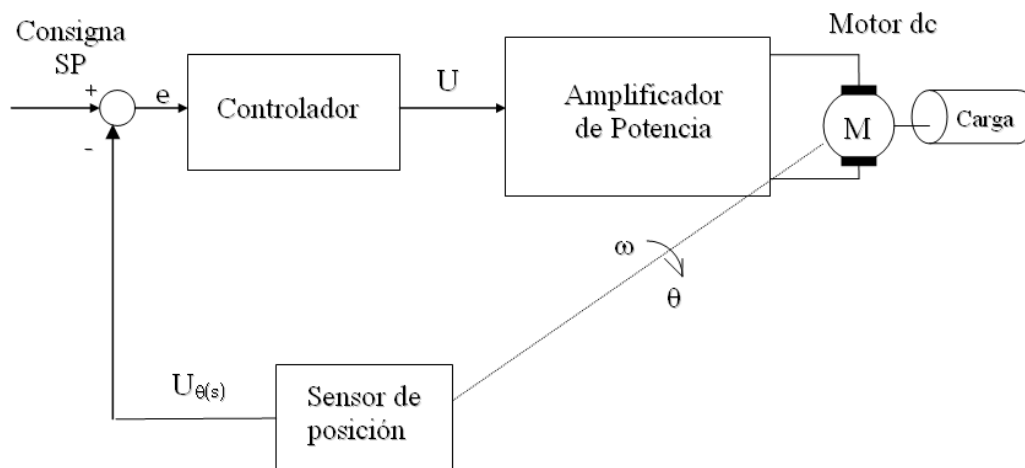


Fig. 7. Sistema típico de control de posición.

La estructura del sistema de control en lazo cerrado que se va a utilizar en este laboratorio se muestra en la Figura 8.

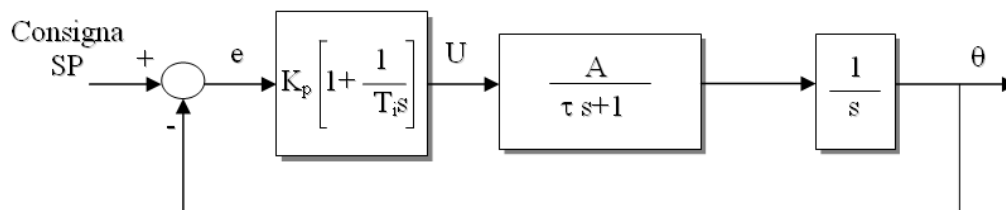


Fig. 8. Control PI para el motor de corriente continua en control de posición.

6. TAREAS EN MODO SIMULACIÓN Y REMOTO (Experimentos)

En este apartado se describen cada uno de los experimentos de laboratorio que el alumno debe realizar tanto en modo simulación como remoto, de manera que de cada uno ellos incluirá la experiencia llevada a cabo en los informes que se envíen al profesor al finalizar las distintas partes de la práctica.

6.1. Entorno de experimentación

Con este primer experimento se pretende que el alumno se familiarice con la aplicación. Para ello ejecutar los pasos siguientes:

1. Encender el computador.
2. Entrar en eMersion con el login y password asignadas.
3. Observar que en el entorno aparece tanto la interfaz de la aplicación como el e-Journal.
4. Observar la interfaz de la aplicación desarrollada con Ejs.
5. Revisar el documento en el que se describe el laboratorio virtual utilizando la aplicación al mismo tiempo.
6. Guardar alguna imagen en el e-Journal.
7. Guardar algún registro de datos en el e-Journal.

6.2. Estudio de las características del proceso modelado

En este experimento se pretende conocer el proceso como conjunto, con sus características estáticas y dinámicas, así como sus componentes.

1. Determinación de la ganancia del motor utilizando la medida de velocidad (amplificador ($K_a = 1$) + motor (A)).

Para ello proceda de la siguiente manera:

- a. Resetee el sistema (Pulsar el botón Reset).
- b. Envíe una tensión de 1 V al amplificador y anote la lectura de velocidad.
- c. Proceda como en el apartado b) con incrementos de 0.5 V en la tensión del amplificador hasta los 3 V. La pendiente de la recta que mejor ajuste los puntos obtenidos (tensión, velocidad) es la ganancia del conjunto amplificador + motor.

$$K = K_a \cdot A$$

- d. Repetir el apartado c) con valores de tensiones desde -1 V y -3 V, el valor de K obtenido debe ser parecido al obtenido en el apartado anterior.

2. Comprobación y Determinación de la zona muerta.

En el estudio del motor se ha supuesto que el sistema es totalmente lineal, en realidad no lo es, una prueba de no linealidad es la existencia de una zona muerta, es decir, de valores de la tensión del amplificador para los que el eje del motor, partiendo del reposo, no se mueve.

- a. Determinar el ancho en voltios de la zona muerta, en torno a la

tensión de parada (0 V).

3. Determinación de la ganancia del motor utilizando la medida de posición (amplificador ($K_a = 1$) + motor (A)).

En este caso no se puede proceder como en el apartado 1) debido a que el sistema en posición es inestable y para un valor de tensión en el amplificador la posición angular crecería indefinidamente.

Para ello proceda de la siguiente manera:

- a. Resetee el sistema (Pulsar el botón Reset).
- b. Envíe una tensión constante al motor, por ejemplo, 3 V.
- c. Observar en el gráfico de la posición que se ve perfectamente el diente de sierra y detener la simulación (pulsar el botón Pause). Cada tramo lineal del diente de sierra corresponde a la integral en el tiempo de la velocidad.
- d. La ganancia del conjunto amplificador + motor se obtiene como:

$$K = K_a \cdot A = \frac{\text{pendiente de un tramo lineal del diente de sierra}}{\text{tensión enviada al amplificador}}$$

- e. Repetir el cálculo de K para otros valores de tensiones de entrada.

Nota: desde el menú e-Journal puede grabar una imagen o generar un registro de datos (útil para posteriormente utilizar los datos registrados en otros programas, por ejemplo en Matlab).

4. Determinación de la constante de tiempo τ del motor.

Se ha supuesto que la dinámica más lenta está asociada al motor y que se puede modelar como una simple constante de tiempo.

Para ello proceda de la siguiente manera:

- a. Resetee el sistema (Pulsar el botón Reset).
- b. Enviar una tensión constante al motor, por ejemplo, 2 V y esperar a que alcance el estacionario.
- c. Registrar la tensión de entrada al amplificador y la respuesta en velocidad.
- d. Cambiar la tensión de 2 V a 4 V y registrar la evolución de la velocidad para dicho cambio. La respuesta en velocidad registrada tendrá la forma típica de un sistema de primer orden a una entrada escalón.
- e. Proceder como se explica en el Anexo 1 (Características de la respuesta temporal) para el cálculo de τ .
- f. Repetir el cálculo de τ para un cambio de 1 V a 3 V.

6.3. Control de velocidad

En este experimento se pretende efectuar control PI ó PID de velocidad, como se indica en la Figura 6, y comprobar el efecto que tienen los parámetros del controlador sobre la respuesta del sistema.

Para ello proceda de la siguiente manera:

- a. Resetee el sistema (Pulsar el botón Reset).
- b. Seleccione del menú principal la opción *Speed Control*.
- c. Seleccione el modo de control automático del menú *Control*.
- d. Fijar los parámetros del controlador a : $K_p = 0.08$, $T_i = 0.6$ y $T_d = 0$.
- e. Cambiar la referencia de velocidad a 30 [°/sec].
- f. Arrancar el experimento utilizando el botón *Play*.
- g. Discutir si la respuesta real, que se presenta en pantalla, está de acuerdo con las raíces características (15) para los parámetros del proceso A y τ determinados en el experimento 6.2 y los parámetros de control K_p y T_i que tenga seleccionados en este momento.
- h. Repetir los puntos desde a) hasta g) con distintos valores de K_p y T_i (usando siempre la misma velocidad de referencia de 30 [°/sec]).
- i. Observar en alguna de las experiencias anteriores que el error en estado estacionario es cero, es decir, que el valor de referencia y el valor de velocidad coinciden transcurrido el transitorio.
- j. Observar si en alguna de las experiencias anteriores se produce saturación de la señal de control. Se recomienda no llegar nunca a esta situación pues el sistema deja de ser lineal.
- k. A la vista de las experiencias anteriores proponer, de forma justificada, unos parámetros de control adecuados para el control de velocidad.

6.4. Control de posición

En este experimento se pretende efectuar control PI ó PID de posición, como se indica en la Figura 8, y comprobar el efecto que tienen los parámetros del controlador sobre la respuesta del sistema.

Para ello proceda de la siguiente manera:

- a. Resetee el sistema (Pulsar el botón de Reset).
- b. Seleccionar del menú principal la opción *Position Control*.
- c. Seleccione el controlador PID del menú *Control*.
- d. Cambiar la referencia de posición a 40°.
- e. Fijar los parámetros del controlador a: $K_p = 0.08$, $T_i = 0.6$ y $T_d = 0$.
- f. Arrancar el experimento pulsando el botón *Play*.
- g. Comprobar en pantalla que se alcanza el valor de referencia de 40° y que la marca de posición del motor se aproxima a 40°.
- h. Repetir e), f) y g) para distintos valores de K_p y T_i .
- i. **(Este apartado solo se considera en modo remoto)**. Observar en alguna de las experiencias anteriores que, a pesar de incluir término integral, el error en estado estacionario no es cero. Este fenómeno es debido al efecto de la zona muerta.
- j. A la vista de las experiencias anteriores proponer, de forma justificada, unos parámetros de control adecuados para el control de posición.

