

Protocolo de tareas: Motor de corriente continua

INTRODUCCIÓN

En este documento se enumeran las distintas tareas que constituyen la práctica que se va a realizar con el motor de corriente continua:

1. TAREAS EN MODO SIMULACIÓN Y REMOTO

Tarea 1: Estudio de las características del motor e identificación del modelo

Realizar las experiencias de control manual propuesta en el apartado 6.2 del guión de prácticas (sección de tareas en modo simulación y remoto (experimentos)).

Tarea 2: Control de velocidad

Realizar la experiencia de control PI propuesta en el apartado 6.3 del guión de prácticas (sección de tareas en modo simulación y remoto (experimentos)).

Tarea 3: Control de posición

Realizar la experiencia de control PI propuesta en el apartado 6.4 del guión de prácticas (sección de tareas en modo simulación y remoto (experimentos)).

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).

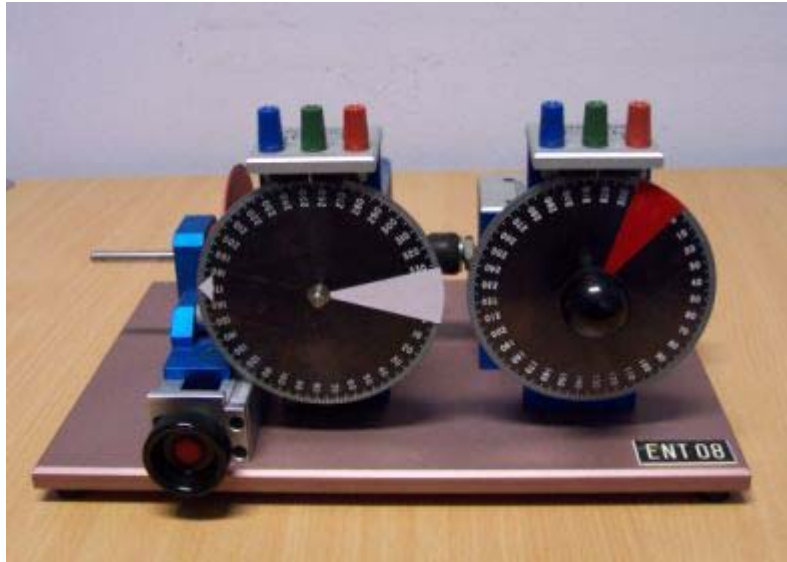


Fig. 1. El Motor de Corriente Continua

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 .

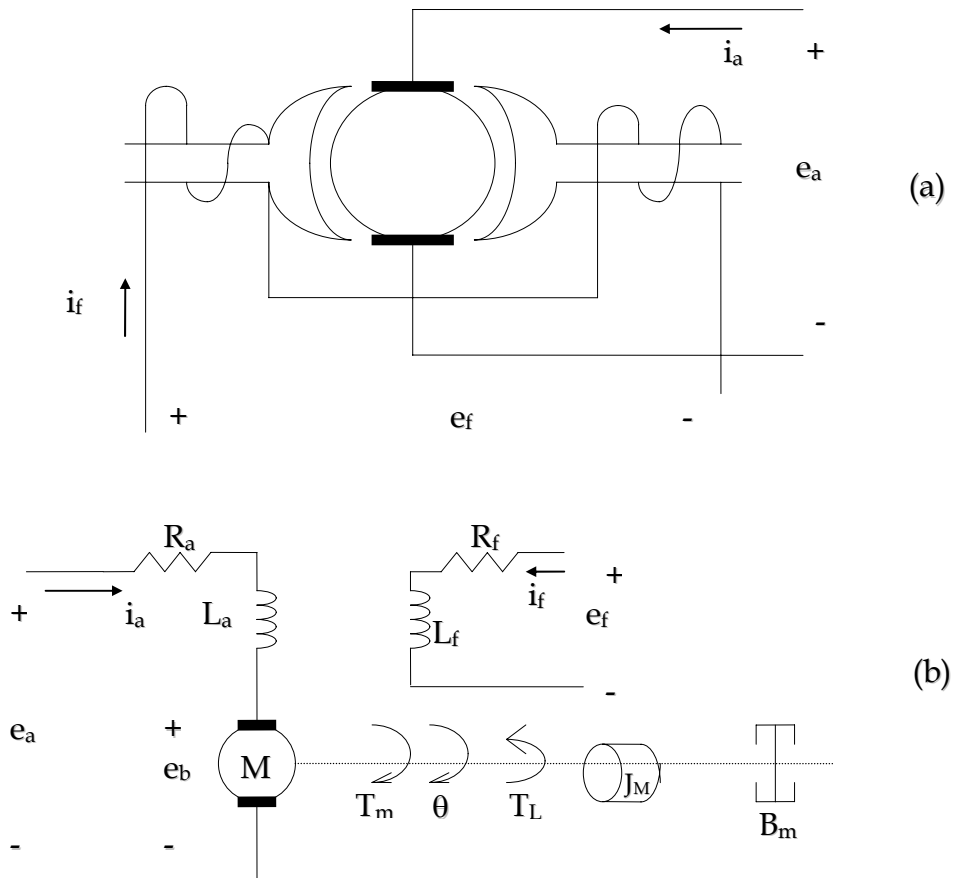


Fig. 2. (a) Esquema de un motor de corriente continua con dos campos excitados por separado. (b) Modelo electromecánico.

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 | inductancia del inducido | $\theta(t)$ | 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:

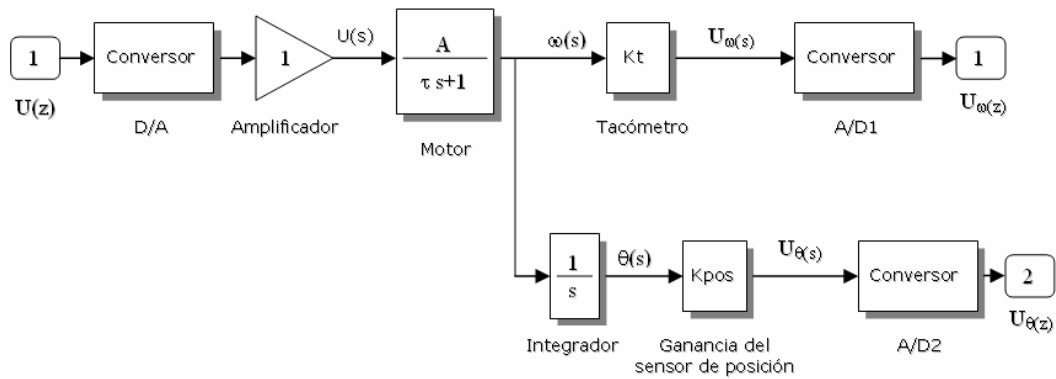


Fig. 3. Modelo experimental del motor de corriente continua para el laboratorio.

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 ($U_w(s)$).

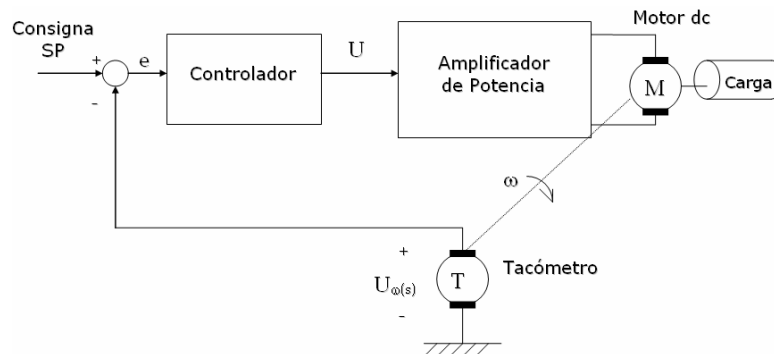


Fig. 4. Sistema típico de control de velocidad.

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

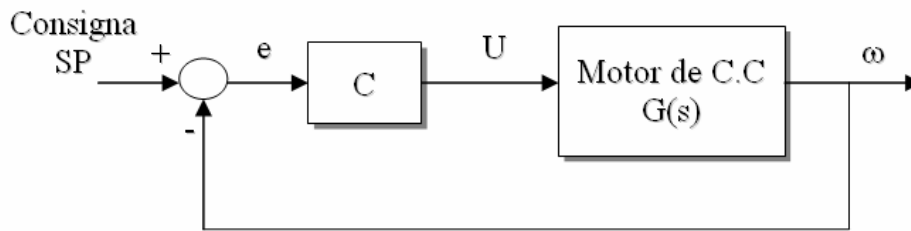


Fig. 5. Estrategia de control para el Motor de Corriente Continua.

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.

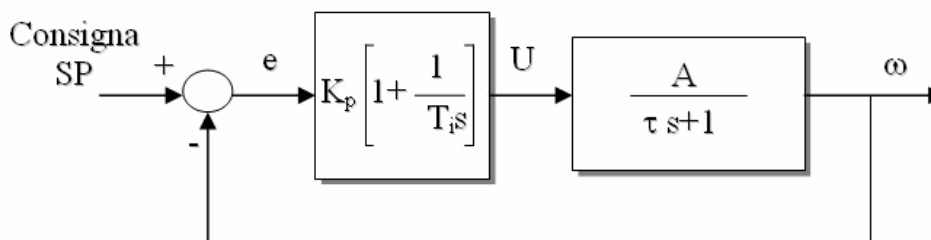


Fig. 6. Control PI para el Motor de Corriente Continua en el control de velocidad.

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 $K_i = \frac{1}{T_i}$, 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.

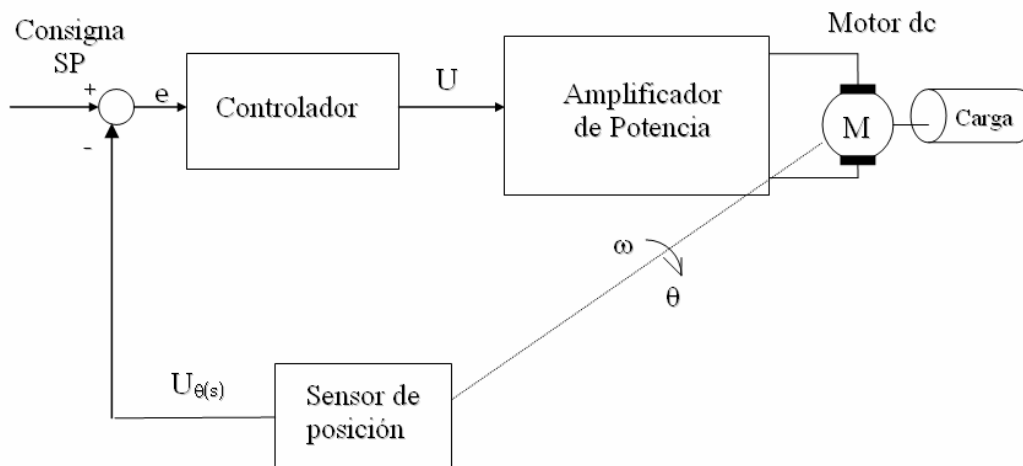


Fig. 7. Sistema típico de control de posición.

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

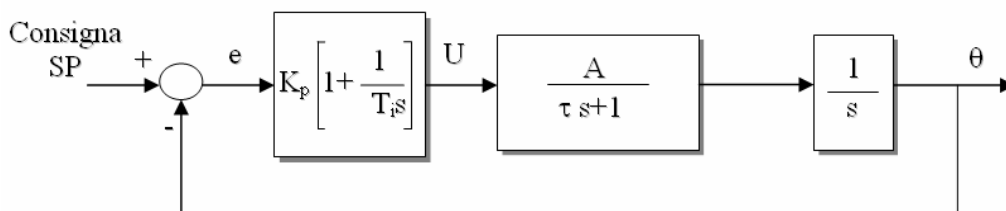


Fig. 8. Control PI para el motor de corriente continua en control de posición.

5. 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. Reseteo 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. Reseteo 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. Reseteo 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 controlador PID del menú *Control*.
- d. Cambiar la referencia de velocidad a 30 [°/sec].
- e. Fijar los parámetros del controlador a : $K_p = 0.08$, $T_i = 0.6$ y $T_d = 0$.
- 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 e), f) y g) para distintos valores de K_p y T_i .
- 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.

Interfaz: Motor de corriente continua

INTRODUCCIÓN

En este documento se describe el entorno desarrollado con Ejs. La aplicación tiene dos partes bien diferenciadas (ver Figura 1). En la parte de la izquierda (que se denominará a partir de ahora **ventana de representación**) se puede observar un esquema del motor de corriente continua. En la parte de la derecha (que se denominará **ventana de evolución**) se muestra la evolución de las principales variables del proceso.

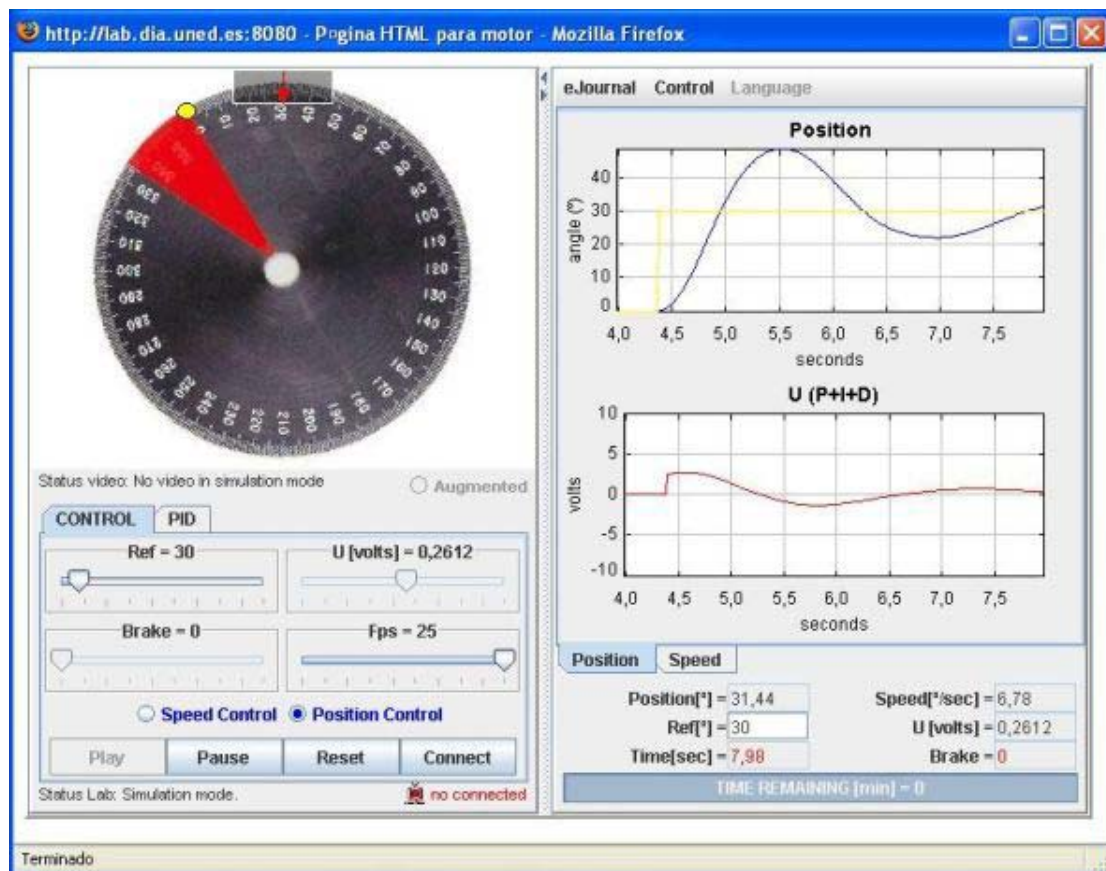


Fig. 1. Interfaz de la aplicación para el motor de corriente continua.

1. VENTANA DE REPRESENTACIÓN DEL SISTEMA

En la parte de la superior de la ventana de representación se puede observar un esquema del motor de corriente continua cuyo ángulo de rotación en torno a su eje central cambiará en función del tipo de control (velocidad o posición) y del estado del proceso.

En la parte inferior hay un panel con una serie de botones que se van a utilizar para actuar sobre el sistema, y que serán descritos con más detalle a continuación.

1.1. Funcionamiento del motor de corriente continua

La planta se puede visualizar de tres formas:

- *En modo simulación.* La planta se muestra tal y como aparece en la figura 1. Cuando se trabaja en este modo, el sistema opera localmente y evoluciona en base a un modelo matemático del proceso.
- *En modo remoto (usando la conexión por Video).* Se muestra la planta real que está en el laboratorio remoto (ver la figura 2). Este modo de funcionamiento se muestra la imagen tomada por vídeo de la planta real que se encuentra en el laboratorio.
- *En modo remoto (usando la realidad aumentada -> Augmented).* Se muestra la planta real que está en el laboratorio remoto y superpuesta a ella una representación simulada del indicador de posición del motor (indicador triangular en rojo de la figura 3). Estas dos últimas formas de visualización sólo se podrán seleccionar si se está trabajando en modo remoto.

En la parte central de la ventana de representación, aparece una descripción que indica el estado del vídeo. El paso de una a otra forma de visualización se explicará en breve.

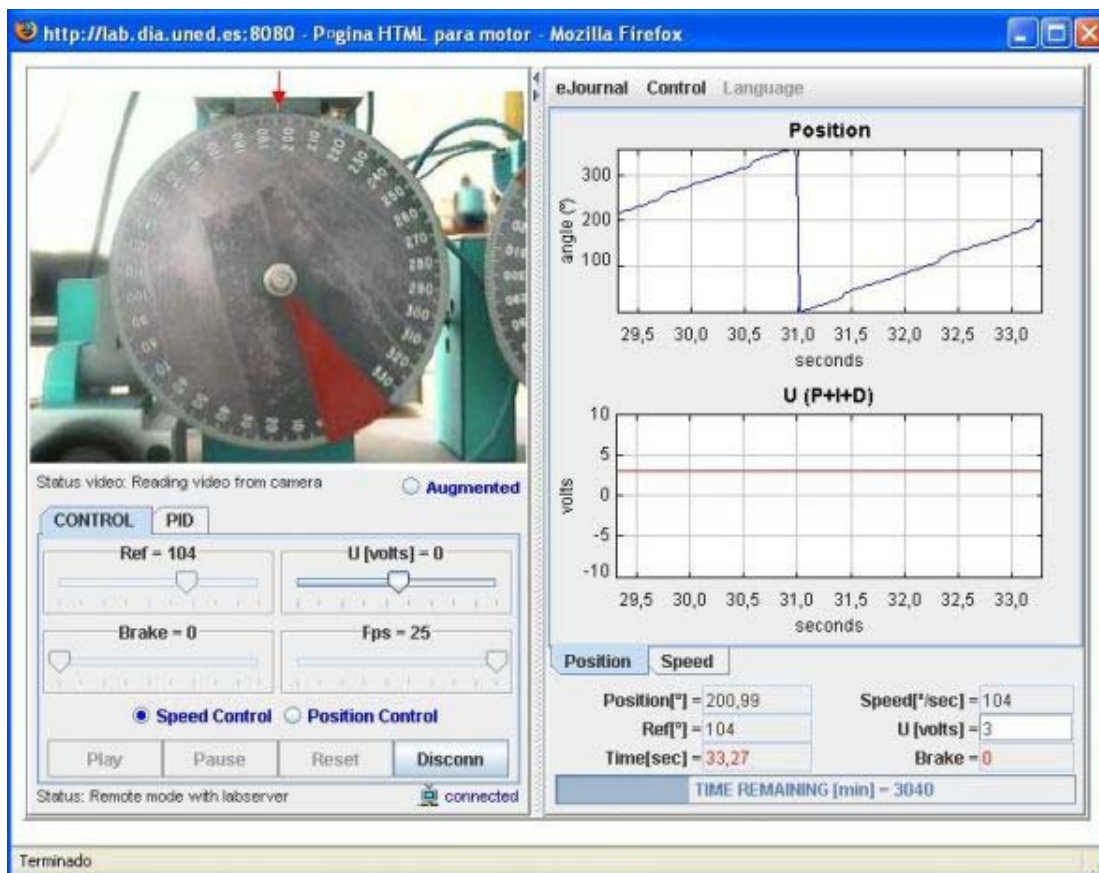


Fig. 2. Vista general de la planta real utilizando la conexión por vídeo.

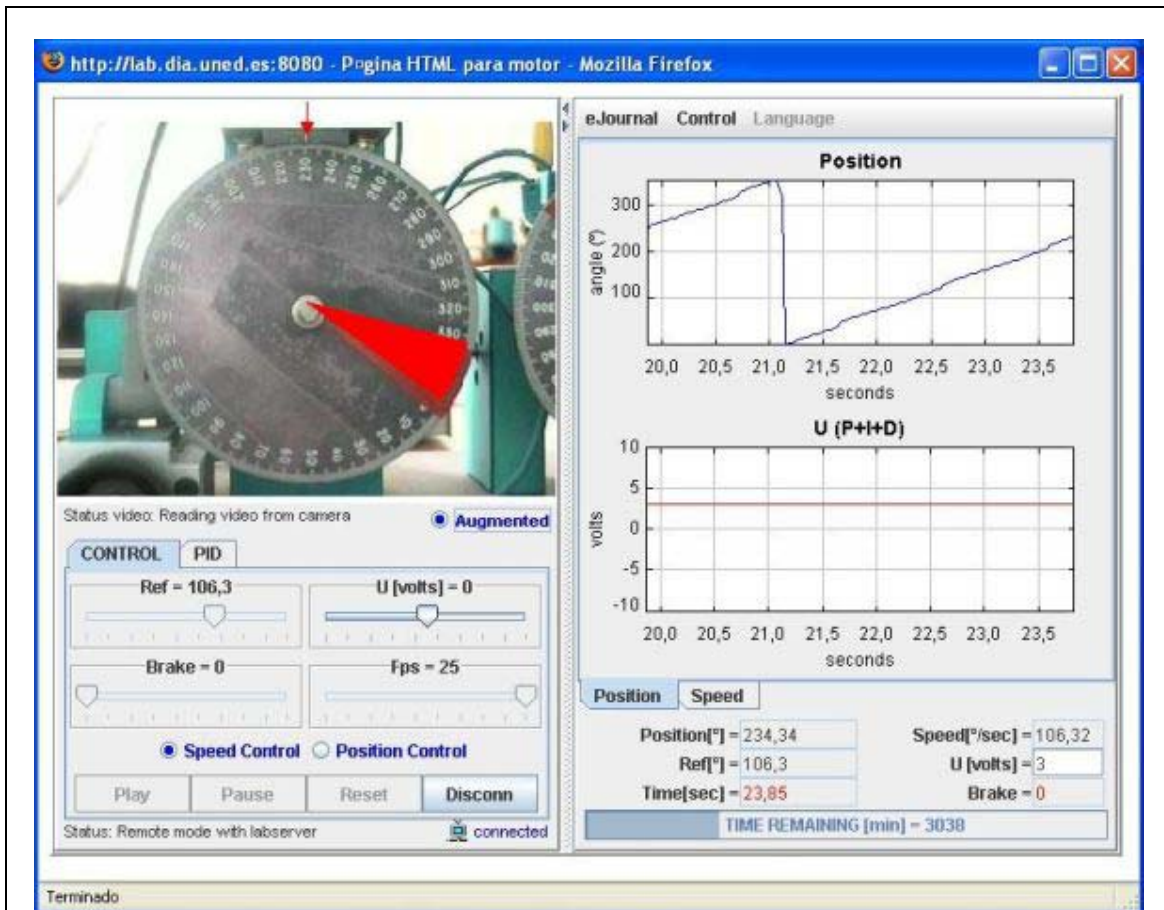


Fig. 3. Vista general de la planta real utilizando la realidad aumentada.

En la parte inferior de la ventana de representación existen dos pestañas que permiten variar el funcionamiento del sistema. Estas tres pestañas son: CONTROL y PID.

1.1.1. Pestaña CONTROL

En la pestaña CONTROL se proporciona un conjunto de sliders, o barras de desplazamiento, así como una serie de botones que permiten definir diversas situaciones en la dinámica del proceso (por ejemplo, realizar un cambio en la consigna o modificar directamente el voltaje aplicado al motor en modo manual).

Hay cuatro sliders que permiten realizar las acciones siguientes:

- Ref: Este slider representa los valores de las consignas para el motor de corriente continua. Cuando el sistema trabaja en control de velocidad (Speed Control), este elemento representa la consigna de velocidad (grados/segundo) de giro que se desea alcanzar. Por el contrario, si el sistema trabaja en control de posición (Position Control), el slider representa la consigna de posición (grados) que se desea alcanzar como objetivo de control.
- U [volt]: es el voltaje aplicado al motor y puede variar entre -10V y +10V.
- Brake [volt]: Representa el voltaje aplicado al freno magnético asociado al disco metálico de rotación (Carga). Este slider no se encuentra activo para estas prácticas.
- Fps: se utiliza para retardar la simulación y poder con ello observar mejor los resultados obtenidos.

Con los botones situados en la fila inferior, el usuario puede controlar las operaciones principales sobre la evolución del sistema. En concreto puede realizar las acciones siguientes:

- **Play.** Sirve para iniciar la simulación.
- **Pause.** Sirve para establecer una pausa en la simulación.
- **Reset.** Sirve para resetear la simulación o conexión remota que se esté llevando a cabo e iniciar de nuevo el trabajo desde cero.
- **Connect.** Si no se presiona este botón, al pulsar el Play la aplicación funciona en modo simulación, por lo tanto, se está ejecutando la aplicación como laboratorio virtual. Si se presiona, permite la conexión con la planta en modo remoto (utilizando el sistema real que se encuentra en el laboratorio) una vez superado el control de acceso (véase la figura 4). Las claves de acceso se facilitarán cuando se permita el acceso a la planta a un determinado estudiante. Se puede observar que cuando se trabaja en modo remoto se activa el botón Augmented, que permite visualizar la planta utilizando realidad aumentada (ver la figura 3). Es importante notar también que cuando se está trabajando en modo remoto los botones de Play, Pause y Reset no están activos.



Fig. 4. Control de acceso al modo remoto.

- **Disconnect.** Durante el tiempo que la planta está trabajando en modo remoto, el botón *Connect* se sustituye por el de *Disconnect* que sirve para parar el funcionamiento del laboratorio y regresar a modo simulación.

1.1.2. Pestaña PID

En la pestaña PID se proporcionan tres campos numéricos que permiten variar los parámetros de los controladores asociados al control automático de velocidad o posición (ver la figura 6). Se puede por lo tanto variar la ganancia proporcional (K_p), el tiempo integral (T_i) y el tiempo derivativo (T_d). Inicialmente tendrán asignados unos valores que permiten operar con el sistema de una forma razonable.

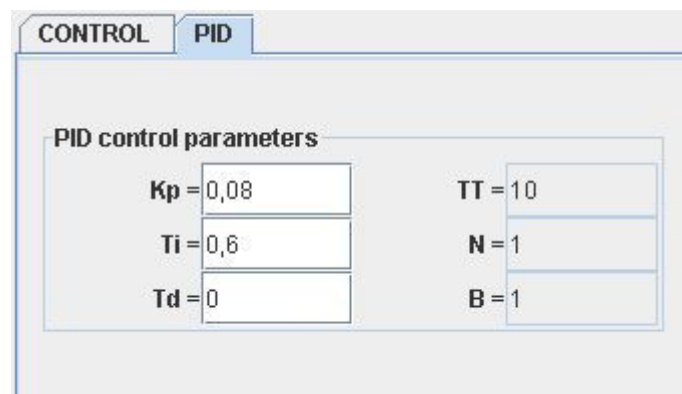


Fig. 5. Pestaña PID.

Por debajo de las pestañas de operación del sistema, aparece una línea informativa donde se explicita el modo de operación del sistema en todo momento. Si se

encuentra en modo simulación, tal y como ocurre en la figura 1, aparecerá la frase: Status Lab: Simulation Mode. No obstante, en caso de operar en forma remota (ver la figura 2) será éste el estado que se muestre (Status Lab: Remote Mode with labserver).

2. VENTANA DE EVOLUCIÓN DEL SISTEMA

A la derecha de la ventana de representación está la ventana de evolución del sistema, en la que se muestra, como su propio nombre indica la evolución de las variables más importantes del proceso (ver la figura 1).

2.1. Menú de archivos de la ventana de evolución

2.1.1. Manejando el eJournal

En la parte superior de la ventana de representación del sistema hay una opción denominada e-Journal. Si se pulsa aparece un menú desplegable con diferentes opciones:

- *Save Graph*. Permite guardar una imagen de la evolución de las variables controladas en formato .gif., es decir, guarda una imagen de las dos gráficas que se encuentran bajo el menú y del valor de los parámetros que están registrado, cuya información se encuentra debajo de las gráficas en la ventana de evolución (indicadores numéricos). Una vez guardada esta información en el e-journal se puede visualizar en el mismo o exportarla a un directorio.
- *Start Record*. Comienza a grabar en un fichero de texto (con extensión *.m) los parámetros de los controladores y los valores de la evolución temporal de las variables controladas y manipuladas. De esta forma, exportando a MATLAB esta información se pueden representar las gráficas que se deseen relativas a los experimentos que se están realizando.
- *Stop Record*. Se activa una vez que la grabación ha comenzado, hasta entonces está deshabilitado. Y cuando se selecciona esta opción se detiene la grabación de datos, finalizando la generación del fichero.

Nota: Se recomienda planificar la utilización de la opción de grabación (Start Record y Stop Record) para guardar sólo la ventana de datos de interés. De esta forma, se evita la carga de ficheros excesivamente grandes que puedan bloquear momentáneamente la aplicación.

Cada vez que se va a guardar una información en el e-journal, tanto si es una figura (Save Graph) como si es un fichero MATLAB (Start Record y Stop Record), se pregunta al usuario si desea realizar esta acción, indicándole el nombre con el que se va a guardar y permitiéndole la opción de cambiarlo si lo desea.

2.1.2. Control del sistema

En el mismo menú de archivos en el que se encuentra la opción de e-journal (parte superior de la ventana de evolución) pero a la derecha de ésta, se encuentra la opción Control, cuyo menú desplegable permite realizar dos posibles acciones sobre el sistema. Dichas acciones son las siguientes:

- MANUAL. Permite que el sistema trabaje en modo manual, es decir, el usuario debe ajustar el voltaje suministrado al calefactor U para obtener el valor de temperatura deseado.
- PID. Permite que el sistema pase a estar controlado por un controlador PID.

2.1.3. Selección de idioma

En el mismo menú de archivos donde se encontraban las opciones de e-journal y control (parte superior de la ventana de evolución) pero a la derecha de esta última opción se encuentra la opción Language, cuyo menú desplegable permite cambiar el idioma de la simulación. Por defecto se encuentra en Inglés (seleccionando English) pero es posible pasarla a Español (seleccionando Spanish).

Nota: Esta opción se encuentra actualmente deshabilitada y el lenguaje predeterminado de la aplicación es el inglés.

2.2. Gráficas de la ventana de evolución

Debajo del menú de archivos de la ventana se encuentran dos gráficas en las que se recoge la evolución de las variables más importantes del proceso. La pestaña Position muestra, en la gráfica superior, la evolución la variable controlada asociada a la posición angular del disco y debajo de ésta, la evolución de variable manipulada asociada al voltaje aplicado al motor de corriente continua (acción de control U). De la misma manera, La pestaña Speed muestra, en la gráfica superior, la evolución de la velocidad de rotación del disco y, en la gráfica inferior, el voltaje aplicado al motor (acción de control U) para alcanzar dicha velocidad.

Debajo de ambas gráficas se muestran un conjunto de campos numéricos que indican el valor de las distintas variables de interés del proceso. En concreto están disponibles los siguientes campos:

- Position [°] y Speed[°/sec]: Muestran los valores de las variables controladas en cada momento expresadas en grados o grados por segundo, respectivamente.
- Ref: Muestra el valor de la consigna deseada. Está expresada en grados [°] si se trabaja en control de posición o en grados por segundo [°/sec] si se trabaja en control de velocidad. Este campo se convierte en campo editable si se selecciona control PID.
- U [volts]: Muestra el valor del voltaje aplicado al motor, expresado en voltios. Este campo se convierte en campo editable cuando el control es manual.
- Time [segundos]: Muestra el instante de tiempo en el que se encuentra la simulación en cada momento, expresada en segundos.
- Brake: Muestra el valor en voltios asociado al freno magnético. **Este campo no se encuentra activo para estas prácticas.**

Debajo de estos campos numéricos aparece un display que indica el tiempo restante en minutos que nos queda para operar con la planta si estamos trabajando en modo remoto (ver figura 2). Este tiempo irá decreciendo mientras dure el transcurso de la práctica, para que el alumno conozca en todo momento el tiempo de conexión a planta del que dispone. No obstante, en caso de trabajar en modo simulación este valor aparecerá a 0 (ver figura 1).

3. RECOMENDACIONES IMPORTANTES

Recuerde que cuando esté trabajando en modo remoto estará operando con las plantas reales ubicadas en el laboratorio de nuestra Universidad, y por lo tanto, existirán ciertas cuestiones relacionadas con la seguridad de las mismas durante su manipulación. En este sentido, a continuación se describen un conjunto de recomendaciones o sugerencias a tener en consideración:

- **Planificación del experimento.** Una correcta planificación del experimento a realizar antes de conectarse a la planta real (modo remoto) optimizará su ejecución y el tiempo ocupado para dicha tarea.
- **Como actuar ante un bloqueo de la aplicación.** Si durante la ejecución de algún experimento (modo virtual o remoto) la aplicación sufriera algún tipo de bloqueo, utilizar el botón Reset para iniciar nuevamente el trabajo.
- **Seguridad del equipamiento en el laboratorio.** Procure trabajar en los niveles nominales de actuación (voltaje aplicado a los actuadores) mencionados en la sección de experimentos del guión de prácticas. La aplicación prolongada de un voltaje próximo a los niveles de saturación del actuador podría dañar el equipamiento electrónico ubicado en el laboratorio de la Universidad.

Características de la respuesta temporal

1. SISTEMA DE PRIMER ORDEN

1.1. Características

Si un sistema de primer orden como el de la figura 1 se excita con una entrada escalón de la forma:

$$x(t) = \begin{cases} m & , t > 0 \\ 0 & , t \leq 0 \end{cases}$$

el sistema responde con una salida

$$y(t) = \begin{cases} km \left(1 - e^{-t/\tau} \right) & , t > 0 \\ 0 & , t \leq 0 \end{cases}$$

La figura 2 representa la respuesta de un sistema de primer orden ($k=1$ y $\tau=1$) a una entrada escalón de amplitud $m=1$:

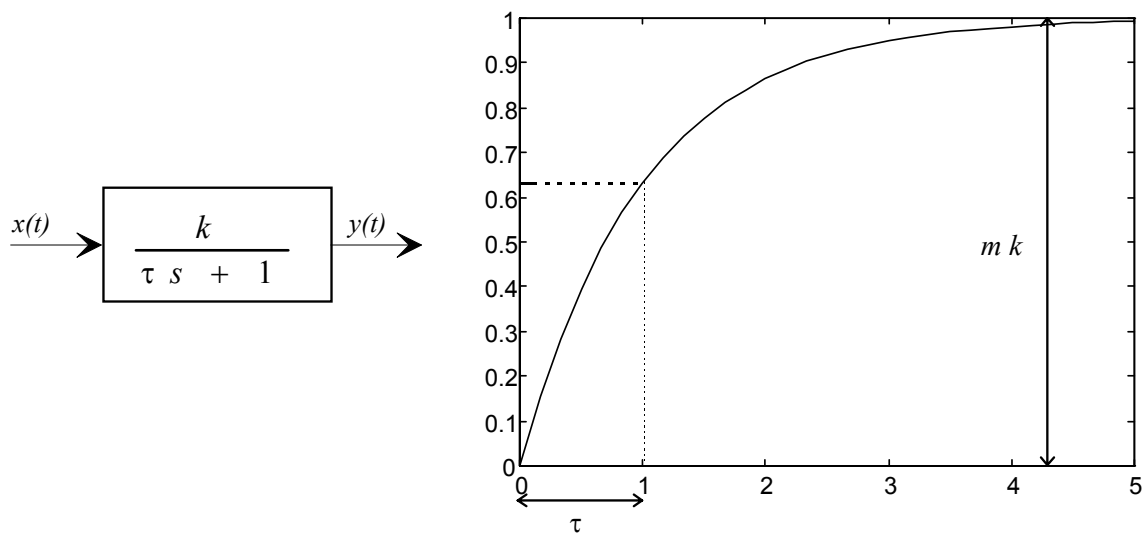


Fig. 1. Sistema de 1er orden.

Fig. 2. Respuesta a entrada escalón.

El valor estacionario de la salida ($\lim_{t \rightarrow \infty} y(t)$) es $k * m$. La constante de tiempo τ es el tiempo que tarda el sistema en alcanzar el 63.2% del valor final.

1.2. Procedimiento para la determinación de k y τ a partir de la respuesta temporal

1. Registrar la respuesta del proceso a una entrada escalón, de amplitud y de instante de cambio conocidos. Para que el registro sea válido, la salida debe haber alcanzado el estacionario. Como la entrada escalón se genera a partir de una onda cuadrada, es conveniente elegir el periodo P de la misma mucho mayor que la constante de tiempo del sistema.
2. Obtener la ganancia k del modelo como el cociente entre el cambio observado en la salida del proceso y la amplitud del escalón de entrada.
3. Obtener la constante de tiempo como el tiempo transcurrido hasta que se alcanza el 63.2% del valor estacionario de la salida.

2. SISTEMA DE SEGUNDO ORDEN

2.1. Características

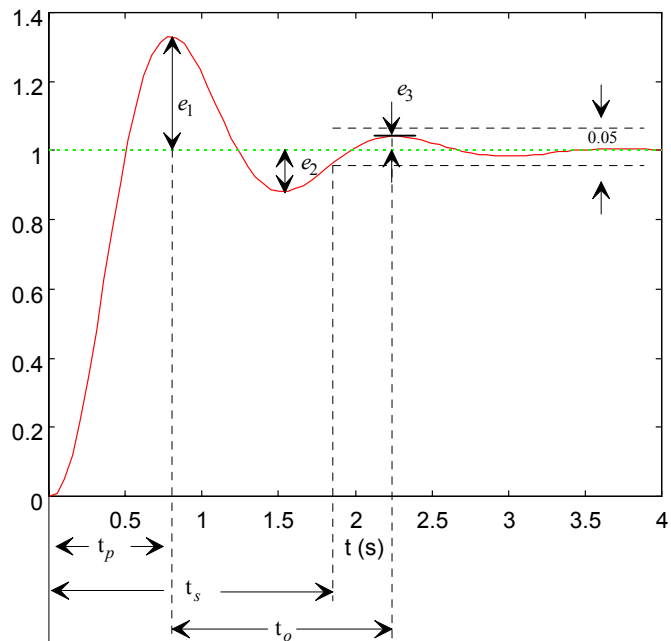
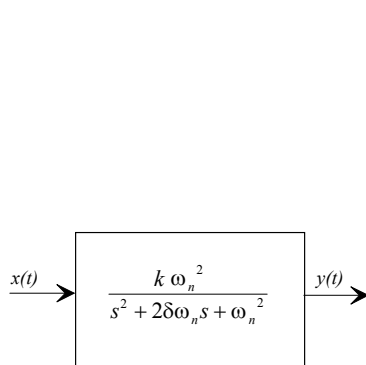


Fig. 3. Sistema de 2º orden.

Fig. 4. Respuesta del sistema de 2º orden con $k=1$ a un escalón unitario.

Si un sistema de segundo orden subamortiguado ($0 < \delta < 1$) como el de la figura 3 se excita con una entrada escalón de amplitud m , tiene la siguiente respuesta

$$y(t) = km \left(1 - \frac{e^{-\delta\omega_n t}}{\sqrt{1-\delta^2}} \text{sen}(\omega t + \phi) \right), \quad \text{donde} \quad \phi = \arctg\left(\frac{\sqrt{1-\delta^2}}{\delta}\right)$$

siendo k = ganancia en estado estacionario

δ = coeficiente de amortiguamiento

ω_n = frecuencia natural y $\omega = \omega_n \sqrt{a - \delta^2}$

Un cambio en δ afecta al carácter oscilatorio amortiguado de la respuesta. Cuando $\delta=1$ (amortiguamiento crítico) la respuesta deja de tener el carácter anterior (oscilatorio amortiguado) y la salida tiende exponencialmente a la entrada. El cambio en ω_n afecta únicamente a la frecuencia forzada y en definitiva a la velocidad de respuesta (tiempo de asentamiento, tiempo de subida,...).

La figura 4 representa la respuesta del sistema de segundo orden con ganancia unidad a un escalón unitario, cuyos máximos relativos e_n se presentan en los instantes t_n ,

$$e_n = e^{-\delta\omega_n t_n}, \quad t_n = \frac{n\pi}{\omega_n \sqrt{1-\delta^2}} \quad ; \quad n = 1,3,5,\dots$$

2.2. Determinación de k , δ y ω_n a partir de la respuesta temporal

La ganancia k se determina del cociente entre la salida del proceso en estado estacionario y la amplitud del escalón de entrada. Los parámetros δ y ω_n del sistema se pueden determinar a partir de la respuesta temporal, midiendo la máxima sobreelongación M_p (valor del primer máximo e_1) y el instante $t_p = t_1$ en que se produce. El procedimiento es el siguiente:

1. Aplicar una entrada de onda cuadrada.
2. Obtener la ganancia k del modelo como el cociente entre la amplitud de salida del proceso en estado estacionario y la amplitud del escalón de entrada.
3. Medir M_p y t_p . (Recuérdese que los máximos de sobreelongación se miden respecto al valor de la salida en el estacionario).
4. A partir de la curva que relaciona M_p con δ (véase figura 5), o bien analíticamente utilizando la expresión

$$\delta = \left| \frac{\ln(0.01M_p)}{\sqrt{\pi^2 + (\ln(0.01M_p))^2}} \right|, \quad M_p \text{ porcentual,}$$

Obtener el coeficiente de amortiguamiento δ .

5. Calcular ω_n a partir de la siguiente expresión: $\omega_n = \frac{\pi}{t_p \sqrt{1-\delta^2}}$

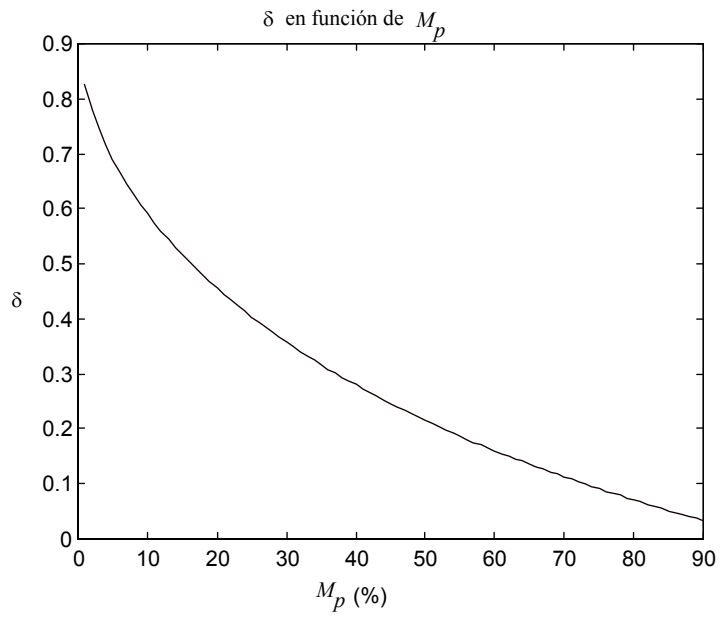


Fig. 5. Curva que relaciona M_p con δ