

## GUÍA DE TRABAJOS PRÁCTICOS N° 1

### Diagramas de bloques de sistemas de control en LC. Modelación de sistemas dinámicos de sistemas LIT. Simulación de Sistemas en LA y LC.

#### Objetivos:

- Identificar las partes y señales que intervienen en un sistema de control automático.
- Comprender los efectos de la realimentación sobre la respuesta temporal en los sistemas de control.
- Determinar las funciones de transferencia de los sistemas a lazo abierto y lazo cerrado.
- Representar un sistema mediante la función de transferencia.
- Aplicar diferentes métodos de modelación experimental.
- Simular sistemas a lazo abierto y a lazo cerrado para obtener las respuestas en el dominio del tiempo y de la frecuencia.
- Analizar los efectos de las perturbaciones que pueden afectar a los sistemas de control.

#### Parte A: Modelación matemática

##### Ejercicio N° 1:

Considere el sistema de control de temperatura a lazo cerrado de la Figura 1. En este sistema se pretende controlar la temperatura  $y(t)$  dentro de la cámara, la cual es calentada a través de vapor. El flujo del vapor  $q(t)$  utilizado en el sistema es proporcional a la apertura  $x(t)$  de la válvula, o sea  $q(t) = K_q x(t)$ . Esta apertura es controlada mediante un solenoide, y la misma es proporcional a la corriente  $i(t)$  en su bobina, es decir  $x(t) = K_s i(t)$ . En el sistema indicado también se considera que la temperatura de la cámara y el flujo de vapor  $q(t)$  están relacionados por la ecuación (1)

$$\frac{dy}{dt} = -Cy(t) + K_c q(t) \quad (1)$$

donde  $C$  es un coeficiente que depende del aislamiento térmico de las paredes de la cámara y de la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior de la misma. Mientras que  $K_c$  vincula la cantidad de vapor con el cambio de temperatura en el recinto. Para simplificar el análisis, se considera que  $C$  es una constante positiva. Teniendo en cuenta lo mencionado, se pide:

- En la figura 1 indicar las partes del sistema de control: planta, actuador, controlador y sensor.

- b. Para cada una de las partes mencionadas, expresar las ecuaciones temporales que intervienen y luego hallar las respectivas funciones de transferencias.
- c. A partir de cada una de las funciones de transferencias halladas en el punto anterior, hacer un diagrama en bloques del sistema de control temperatura a lazo cerrado indicando las señales que intervienen y cada una de las funciones mencionadas dentro de los bloques.
- d. Teniendo en cuenta el diagrama anterior, hallar la función de transferencia a lazo abierto en el camino directo  $G_{LA}(s)$  y función de transferencia a lazo cerrado  $G_{LC}(s)$ . Siendo  $G_{LC}(s) = \frac{G_{LA}(s)}{1 + H(s)G_{LA}(s)}$ , donde  $H(s)$  es la función de transferencia del sensor. Indicar la ganancia, los ceros y los polos de las funciones  $G_{LA}(s)$  y  $G_{LC}(s)$ .
- e. Siendo  $K_1 = 100 \text{ V/V}$ ;  $K_2 = 1 \text{ V/}^\circ\text{C}$ ;  $K_q = 1 \text{ (kg/s)/m}$ ;  $K_s = 1 \text{ m/A}$ ;  $K_c = 1 \text{ }^\circ\text{C}/(\text{kg/s})$ ;  $R = 100 \text{ } \Omega$ ;  $L = 0,1\text{mH}$  y  $C = 0,25 \text{ 1/m}$ , hallar las funciones de transferencia mencionadas en el punto anterior, indicando ganancia, ceros y polos.
- f. Graficar la respuesta temporal de la temperatura con el sistema a lazo abierto y a lazo cerrado, considerando un escalón  $v_r(t) = 10 \text{ V}$  (graficar en forma superpuesta las dos respuestas mencionadas). Graficar las respuestas de magnitud y fase de lazo abierto y de lazo cerrado. Analizar las respuestas obtenidas y sacar conclusiones acerca de las mismas.

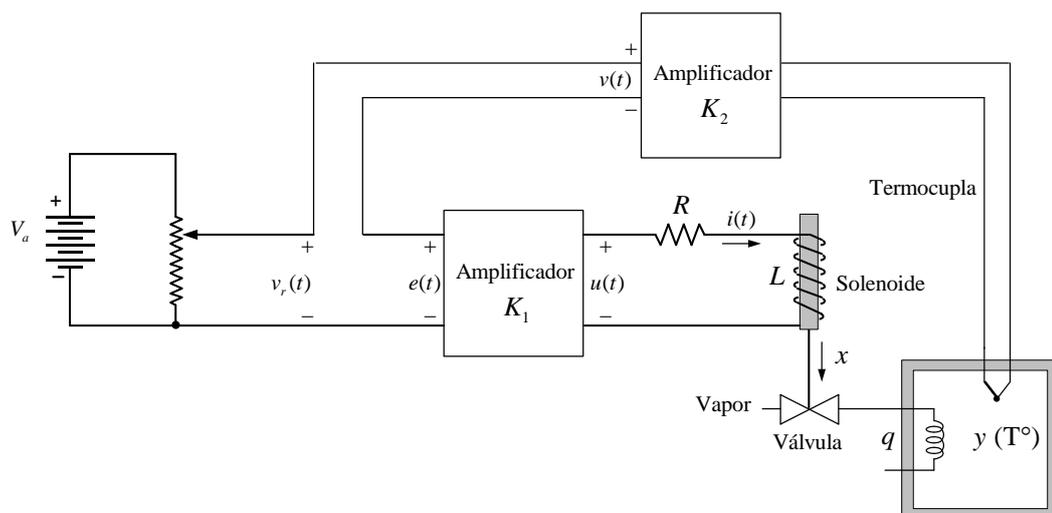


Figura 1.

- g. Teniéndose en cuenta que la cámara no es totalmente adiabática y puede alterarse la temperatura interna por pérdida de calor, se tiene en cuenta este efecto en la ecuación (2) con una

componente de perturbación  $Q_p(t)$ , con lo cual dicha ecuación resulta:

$$\frac{dy}{dt} = -Cy(t) + K_c q(t) - K_c Q_p(t) \tag{2}$$

Incorpore en el diagrama de bloques de lazo cerrado esta perturbación; escriba la ecuación de la salida  $Y(s)$  incluyendo la misma; analice su efecto en la respuesta de salida ante una aplicación en escalón de  $Q_p(t) = 2 \text{ kg}$  con  $v_r(t) = 0 \text{ V}$  y finalmente analice el efecto en la respuesta de  $y(t)$ , combinando ambos efectos con  $v_r(t) = 10 \text{ V}$ .

**Nota: Realizar las simulaciones de este punto con PSIM.**

**Ejercicio N° 2:**

El motor de corriente continua de imanes permanentes de la empresa Maxon denominado DCX 35 L Ø35 mm alimentado por un convertidor PWM reductor de tensión se esquematiza en la Figura 2.

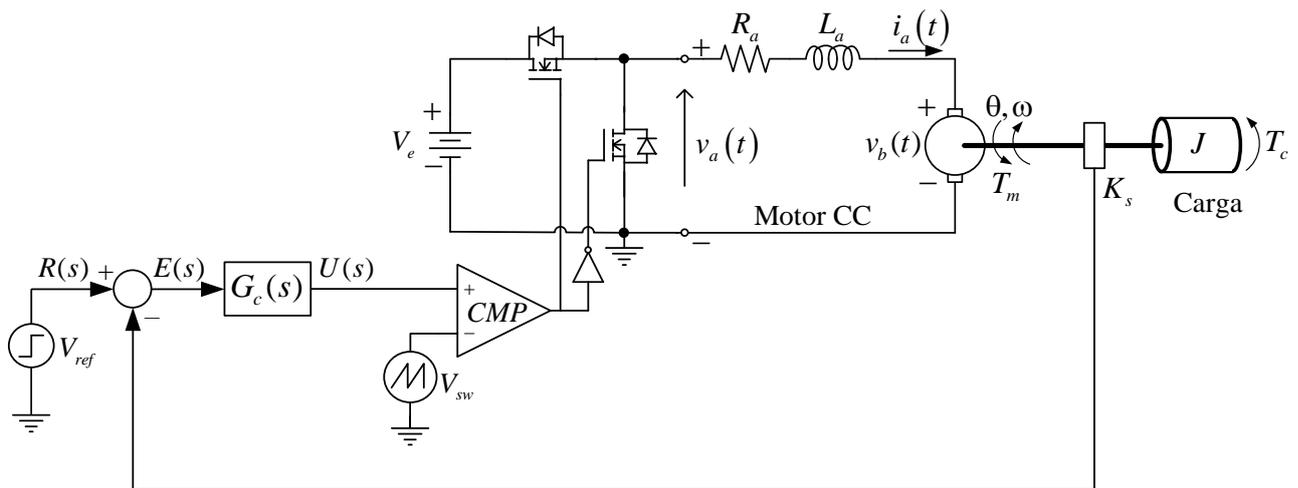
Donde  $R_a = 2,16\Omega$ ;  $L_a = 0,776\text{mH}$ ;  $K_t = 74,1\text{mN} \times \text{m} / \text{A}$ ;  $K_b = 0,074 \text{ V}/(\text{rad/s})$ ;

$J = 9,52 \mu\text{N} \times \text{m} / (\text{rad/s}^2)$  y  $b = 25,4 \mu\text{N} \times \text{m} / (\text{rad/s})$ . La velocidad nominal es de 7150 rpm y la

tensión nominal de armadura es  $V_a = 60\text{V}$ . La tensión de entrada al convertidor es  $V_e = 65 \text{ V}$ .

Más datos del motor pueden obtenerse en:

<https://www.maxongroup.com/maxon/view/product/motor/dcmotor/DCX/DCX35/DCX35L01GBKL604>



**Figura 2.**

El actuador posee una ganancia definida por el coeficiente  $K_a = V_e/V_{sw}$ , siendo  $V_{sw}$  la tensión de pico de la señal triangular o diente de sierra, denominada señal portadora. Con esto, la tensión aplicada a la planta está dada por  $v_a(t) = K_a u(t)$ . Por otro lado, el sensor posee una ganancia  $K_s$ , la cual se establece de manera tal que su salida proporcione 4V cuando el motor gira a la velocidad nominal, o

sea,  $K_s = \frac{4\text{ V}}{7150\text{ rpm}}$ . En este caso, es importante recordar que la velocidad nominal a utilizar para el

cálculo de  $K_s$ , debe estar expresada en rad/s y no en rpm. Finalmente, la tensión de pico de la señal diente de sierra es  $V_{sw} = 10\text{ V}$  y la frecuencia de  $v_{sw}(t)$  es de 5 kHz.

Para el sistema indicado se pide:

1 – Indicar y recuadrar en la figura las partes del sistema de control y luego, representarlas en un diagrama de bloques indicando los respectivos nombres como así también las variables a la entrada y a la salida de cada bloque.

2 – Encontrar las ecuaciones que modelan la dinámica del motor el cual incluye la carga de momento de inercia  $J$  y el coeficiente de fricción  $b$  de todo el conjunto. Obtener la función de transferencia en el dominio de Laplace asociada a estas ecuaciones que surgen de las leyes de Kirchhoff de mallas y nodos para poder obtener así un diagrama de bloques correlativo con dichas funciones de transferencia, separando las plantas eléctrica y mecánica. **NOTA: Obtener las ecuaciones del circuito sin la incidencia del lazo de control, ni del sensor ni del actuador; considerándose únicamente la tensión  $V_a$  de entrada.**

3 – A partir del diagrama de bloques de la planta obtenido en el punto anterior, obtener el respectivo diagrama de bloques de LC y las funciones de transferencia de lazo abierto y de lazo cerrado, ahora sí teniéndose en cuenta las ganancias del sensor y del actuador. Tener en cuenta la ganancia del sensor siempre en el lazo de realimentación.

Incorporar en las funciones de transferencia de LA y LC los parámetros del circuito y obtener en Matlab las respectivas funciones de transferencia indicando en cada caso, la ganancia, ceros y polos. Mostrar en un mismo gráfico la respuesta al escalón unitario de cada FT e indicar sus parámetros característicos: tiempos de respuesta; sobrepaso (si hubiere); valores de régimen estacionario. Para la FT de LC tomar  $G_c(s) = 1$ .

4 – Simular el circuito en PSIM a LA utilizando el diagrama de bloques obtenido en el punto 2, con una tensión de entrada  $V_e = 60\text{ V}$ . Utilizar un paso de simulación de 5  $\mu\text{s}$  y un tiempo máximo de simulación de 60 ms, aplicando en 30 ms un torque de perturbación de 118 mNm.

A – Graficar la velocidad de salida en RPM junto con el valor de velocidad nominal en RPM; en otro gráfico la corriente de armadura  $i_a(t)$  y en un tercero, el torque electromagnético  $T_e(t)$ . Obtener el valor máximo que alcanza la velocidad antes de la perturbación y el valor final luego de aplicada la misma. Para la corriente y el torque obtener el pico máximo en el arranque y los valores de régimen estacionario, antes y después de aplicada la perturbación y verificar con la hoja de datos si

están dentro de los valores nominales.

Realizar un análisis de las variables graficadas del régimen transitorio y estacionario.

5 – Simular el circuito en PSIM a LC utilizando el diagrama de bloques obtenido en el punto 3 que incorpora la ganancia del sensor y del actuador, con una tensión de referencia  $V_{ref} = 4\text{ V}$ . Utilizar un paso de simulación de  $5\ \mu\text{s}$  y un tiempo máximo de simulación de  $60\text{ ms}$ , aplicando en  $30\text{ ms}$  un torque de perturbación de  $118\text{ mNm}$ . Evaluar la operación del motor para 2 valores de  $G_c(s)$ : 10 y 100.

A – Trazar los mismos gráficos indicados en el punto 4-A para ambos valores de ganancia del controlador. Obtener en cada caso los valores que alcanza la velocidad antes de la perturbación y el valor final luego de aplicada la misma. Para la corriente y el torque obtener en cada caso el pico máximo en el arranque y los valores de régimen estacionario, antes y después de aplicada la perturbación y verificar con la hoja de datos si están dentro de los valores nominales.

Realizar un análisis de las variables graficadas del régimen transitorio y estacionario en cada caso.

### **Ejercicio N° 3:**

En la Figura 3 se muestra un convertidor reductor de tensión (comúnmente denominado convertidor *buck*) sincrónico de potencia de salida  $P_o = 120\text{ W}$  cuya tensión en la salida debe ser mantenida constante midiéndose la misma en bornes del capacitor del filtro pasa bajos. La inductancia  $L$  del filtro pasa bajos tiene un valor de  $120\ \mu\text{H}$ ; la resistencia equivalente serie  $r_L$  es de  $0,35\ \Omega$ ; la capacitancia  $C$  del filtro pasa bajos de salida tiene un valor de  $40\ \mu\text{F}$  y la carga  $R = 1,2\ \Omega$ .

La tensión de entrada  $V_i = 24\text{ V}$  y la tensión de salida constante deseada es de  $12\text{ V}$ . Para acondicionar la tensión regulada de salida al circuito electrónico de control, se utiliza un divisor resistivo y un amplificador operacional en configuración seguidor de tensión, cuya ganancia final es  $K_s = 1/2$ . El actuador tiene una ganancia  $K_a = V_i/V_{sw}$  siendo  $V_{sw}$  el valor de pico de la señal portadora diente de sierra o triangular  $v_{sw}(t)$  igual a  $10\text{ V}$  y  $V_{cc} = \pm 15\text{ V}$ . La frecuencia de  $v_{sw}(t)$  es de  $100\text{ kHz}$ . Se pide para esta fuente de alimentación lo siguiente:

1 – Indicar y recuadrar en la figura las partes del sistema de control y luego, representarlas en un diagrama de bloques indicando los respectivos nombres como así también las variables a la entrada y a la salida de cada bloque.

2 – Encontrar las ecuaciones que modelan la dinámica del convertidor, obtener las funciones de transferencias en el dominio de Laplace asociadas a estas ecuaciones que surgen de las leyes de Kirchhoff de mallas y nodos para poder obtener así un diagrama de bloques correlativo con dichas

funciones de transferencia. **NOTA:** Obtener las ecuaciones del circuito sin la incidencia del lazo de control, ni del sensor ni del actuador.

3 – A partir del diagrama de bloques de la planta obtenido en el punto anterior, obtener el respectivo diagrama de bloques de LC y las funciones de transferencia de lazo abierto y de lazo cerrado, ahora sí teniéndose en cuenta las ganancias del sensor y del actuador. Tener en cuenta la ganancia del sensor siempre en el lazo de realimentación.

Incorporar en las funciones de transferencia de LA y LC los parámetros del circuito y obtener en Matlab las respectivas funciones de transferencia indicando en cada caso, la ganancia, ceros y polos.

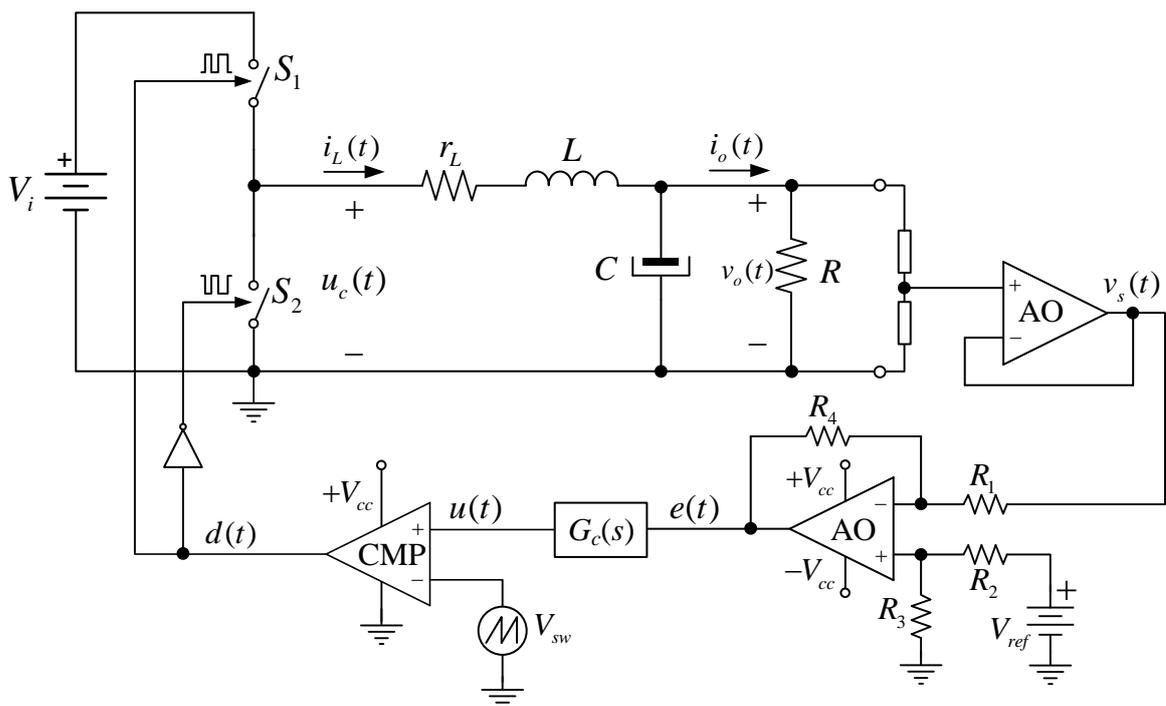


Figura 3.

4 – Simular el circuito en PSIM primero a lazo abierto en base al circuito de la Figura 4, en el cual

$$V_{ref} = \frac{15,5 \text{ V}}{24 \text{ V}} \times V_{sw}$$

para que la fuente pueda suministrar la tensión y corriente deseadas a la salida.

Utilizar un paso de simulación de 10 ns y un tiempo máximo de simulación de 2 ms.

A – Graficar la tensión de salida y corriente de la carga y obtener los valores de pico máximo y los valores de régimen estacionario, de la tensión de salida y de la corriente de carga.

B – Graficar la tensión PWM  $u_c(t)$  aplicada a la planta (filtro LC) y conjuntamente el promedio de esta tensión usando la herramienta de Simview mostrada en la clase, indicando cuál es el valor

alcanzado por este promedio y el valor del ciclo útil aplicado en lazo abierto.

5 – Con la misma configuración de parámetros de simulación, evaluar a continuación el circuito en LC de la Figura 3 considerando  $V_{ref} = 12 \text{ V} \times K_s$  y probar el desempeño de régimen transitorio y estacionario con dos valores de ganancia del controlador  $G_c(s)$  de 10 (V/V) y de 100 (V/V).

A – Graficar por separado las tensiones de salida y las señales de error de tensión para cada valor de ganancia del controlador. Indicar los valores de pico y los de régimen estacionario alcanzados por la tensión de salida.

B – Graficar por separado las tensiones de salida y los valores promedios de las tensiones  $u_c(t)$  aplicadas a la planta para cada valor de  $G_c(s)$  indicándose cuáles son dichos valores y el respectivo ciclo útil en cada caso.

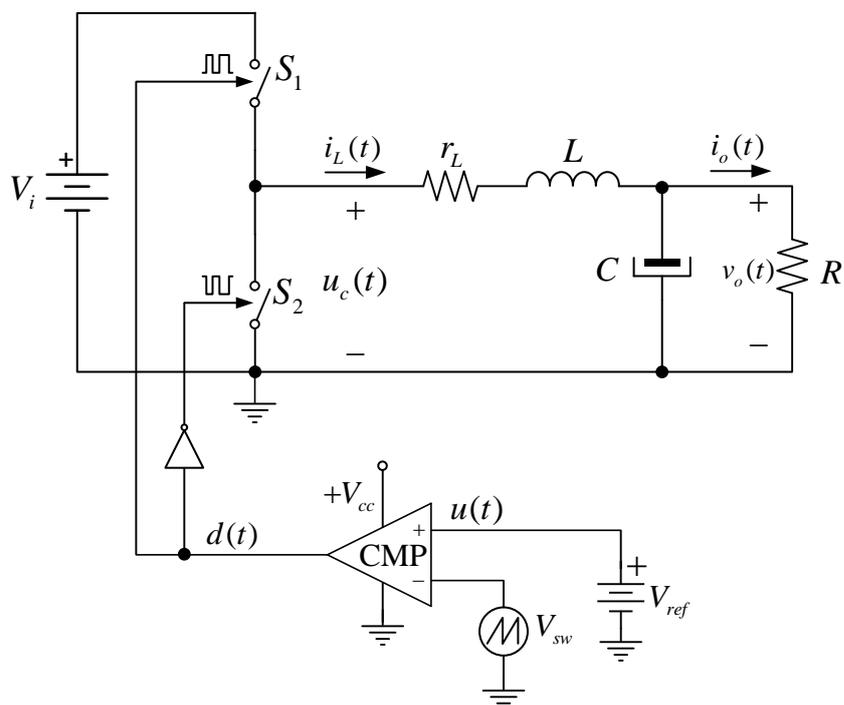


Figura 4.

#### Ejercicio N°4:

En la Figura 5 se observa la respuesta de un motor de corriente continua donde se aplica una tensión a la armadura de 300Vcc y se obtiene la velocidad en el eje en rad/s. Para este sistema se pide:

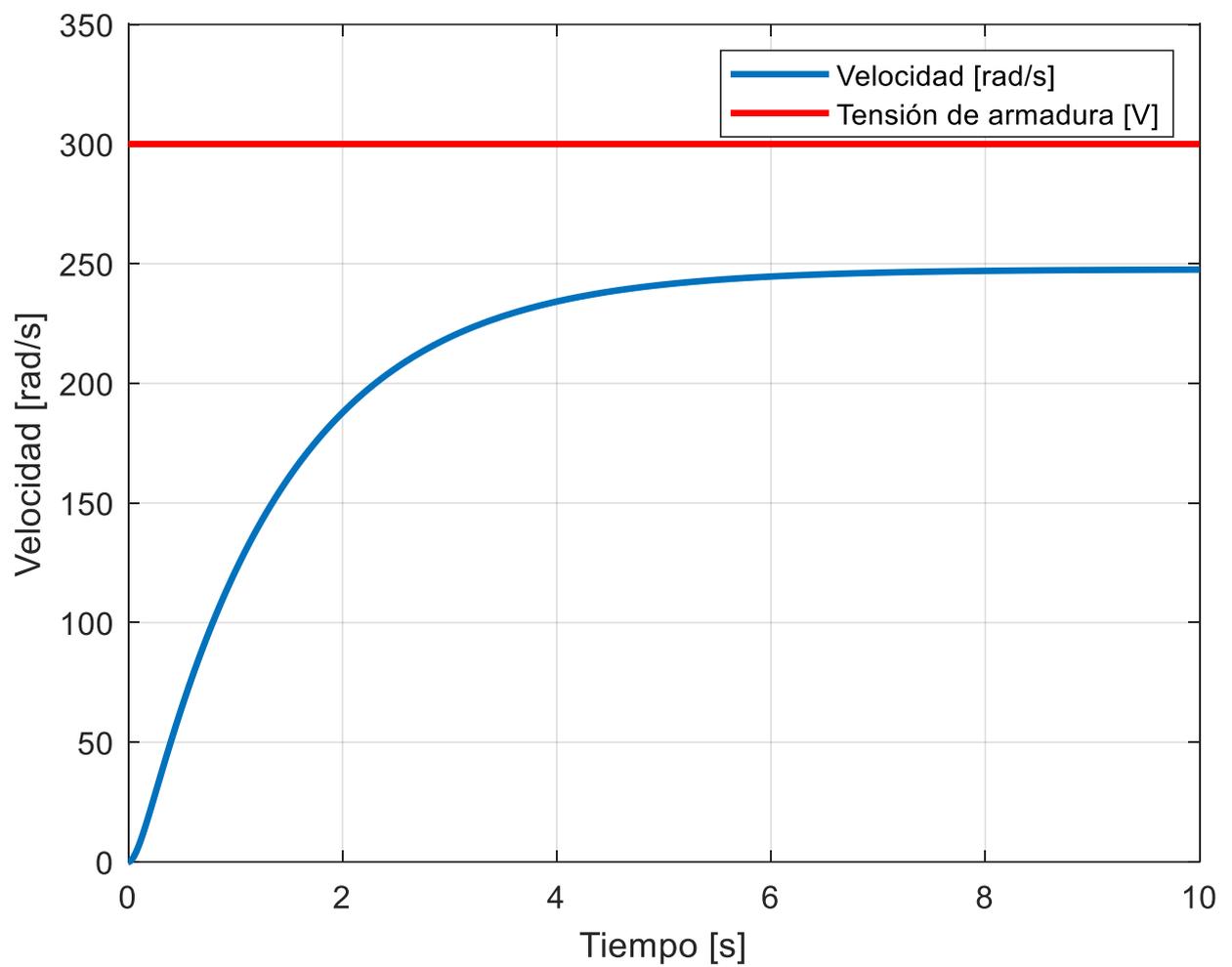
- Definir el orden del mismo y fundamentar su respuesta.
- Estimar su función de transferencia con los métodos:
  - Método de primer orden de Ziegler-Nichols.
  - Método de primer orden de Hägglund.

- Método de primer orden y de dos puntos de Sundaresan y Krishnaswamy.
  - Método de segundo orden y de tres puntos de Stark – Mollenkamp.
- c. Obtener las respuestas con las cuatro estimaciones y presentarlas en una sola gráfica. Analizar e indicar cuál de las respuestas estimadas se aproxima más a la real y explicar los motivos.
- d. Hallar la respuesta en frecuencia y comparar con la respuesta temporal, analizando cómo afectan los polos y ceros del sistema a dichas curvas. Expresar conclusiones.
- e. Para determinar que método se aproxima en mayor medida a la respuesta original se deberá emplear la sumatoria del error absoluto de predicción (SEAP) y cuadrático (SECP). Las expresiones a emplear serán las siguientes:

$$SEAP = \sum_{k=1}^N |y_p(k) - y_m(k)|, k = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

$$SECP = \sum_{k=1}^N [y_p(k) - y_m(k)]^2, k = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

Donde  $y_p(k)$  es el valor actual de la medida de la salida de la planta (valor real obtenido del gráfico de la figura 5) e  $y_m(k)$  es el valor en el mismo instante, de la salida de la planta obtenida por el método de identificación utilizado. El número de muestras  $N$  deberá ser igual a la cantidad de datos obtenidos del gráfico de la figura 5, de manera que el sistema llegue al valor de régimen permanente.

**Figura 5.**