

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES
Departamento de Electrónica

Materia: Sistemas de control
Trabajo práctico N°1

Docente: Ing. Juan Collazo

Jefe de TP: Ing. Pablo Cerallo

Ayudante de TP: Ing. Leandro Rios

Alumnos :

	Apellido y Nombre	Legajo
1	Bonzini, Aramis	141.582-1
2	Martinez, Nahuel	140.940-2
3	Michelli, Augusto	141.237-1
4	Pose, Fernando	143.791-4

Índice

Objetivo: Identificación de los sistemas	3
Metodología de trabajo	3
OBTENCIÓN DE LOS PARÁM. DEL SERVOMOTOR DE CORRIENTE CONTINUA	4
RESISTENCIA E INDUCTANCIA DE ARMADURA.....	5
Cálculo de la resistencia de armadura.....	6
Cálculo de la inductancia de armadura.....	6
Constante voltimétrica K_b y torquimétrica K_t	7
Cálculo de la constante voltimétrica.....	7
Inercia y rozamiento mecánicos	8
Cálculo del momento de inercia	8
OBTENCIÓN DEL RESTO DE LOS PARÁMETROS DEL CIRCUITO	10
Sumador y amplificador	10
Cálculo de la ganancia de los amplificadores.....	11
Potenciómetros de referencia y de realimentación	12
Zonas de trabajo de los potenciómetros	12
Constante de conversión del tacómetro.....	13
ESQUEMA FINAL EN BASE A LAS MEDICIONES.....	14
Motor a lazo abierto.....	14
Seguidor de posición.....	14
Seguidor de velocidad.....	15
COMPARACIÓN DE LOS POLOS EXACTOS CON LOS APROXIMADOS.....	16
CONCLUSIÓN DE LAS COMPARACIONES.....	17
RESUMEN DE LOS PARÁMETROS DEL MOTOR ENSAYADO.....	17

OBTENCIÓN DE LA FUNCIÓN TRANSFERENCIA PARA TODOS LOS COMPONENTES DE UN LAZO DE CONTROL DE POSICIÓN Y VELOCIDAD ANGULAR

Objetivo: Identificación de los sistemas

Obtener mediante mediciones de laboratorio, las ganancias y constantes de tiempo de todos los componentes pertenecientes a un lazo de control de posición y velocidad angular, basados en un motor de corriente continua. Se incluye la determinación de la zona muerta del servomotor.

Metodología de trabajo

Para poder realizar todas las mediciones y obtener luego los parámetros característicos de todos los componentes del circuito, se debe conocer el modelo equivalente del motor. Para esto se le realizan primeramente las pruebas que se requieran para obtener los datos de la resistencia de armadura, la inductancia de armadura, el rozamiento y la inercia mecánicas, y las constantes voltimétrica y torquimétrica. Una vez conocido el motor, se procede a realizar un sistema de control seguidor de posición, mediante el cual se puedan obtener las constantes de los potenciómetros de referencia y de realimentación, junto con la cadena amplificadora.

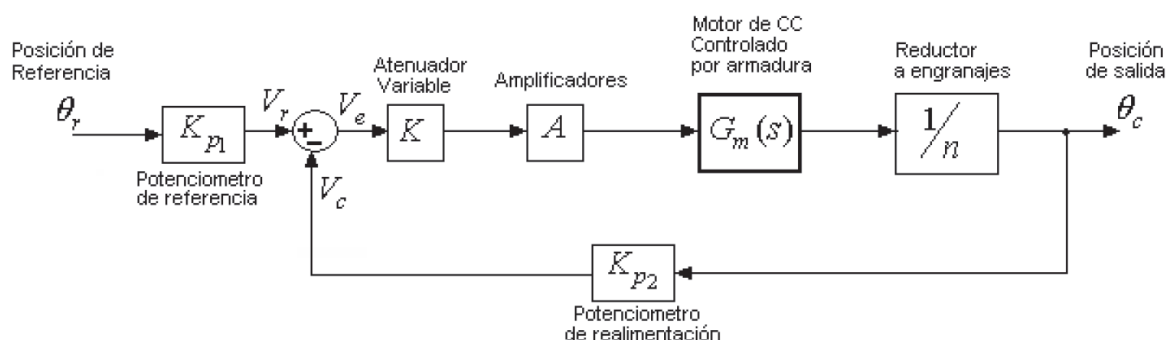


Ilustración 1: Diagramas de bloques para el control de posición angular.

Luego, sólo resta hallar la constante taquimétrica del sensor de velocidad, para lo cual se armará un sistema de control seguidor de velocidad angular.

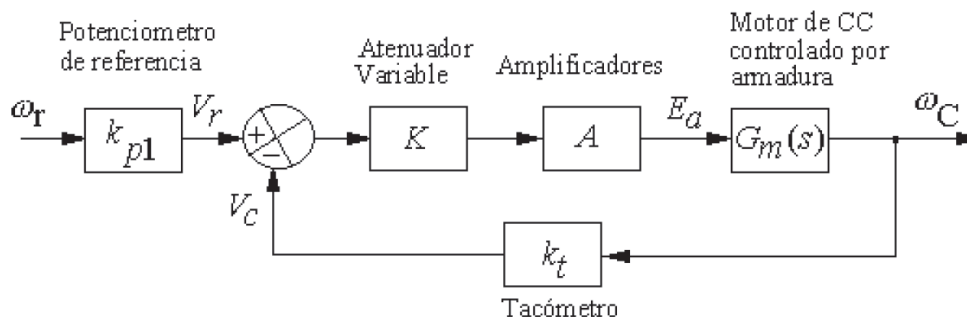


Ilustración 2: Diagrama de bloques para el control de velocidad angular.

OBTENCIÓN DE LOS PARÁM. DEL SERVOMOTOR DE CORRIENTE CONTINUA

El servomotor de corriente continua con el cual se trabajará posee el siguiente esquema equivalente:

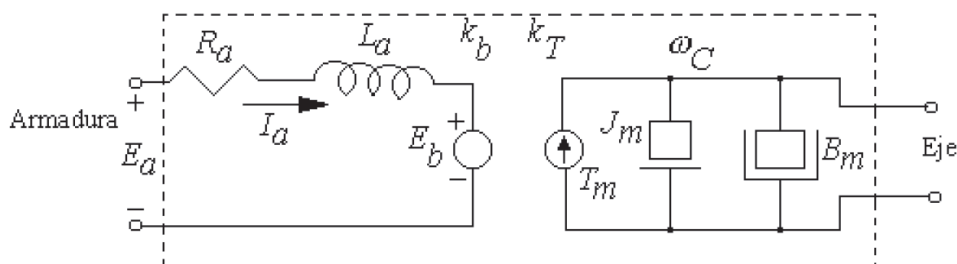


Ilustración 3: Modelo equivalente analógico del motor de corriente continua.

Ecuaciones de funcionamiento:

$$\begin{cases} 1) E_a = (R_a + s * L_a) * I_a + E_b \\ 2) T_m = (B_m + s * J_m) * W \\ 3) E_b = k_b * W \end{cases}$$

Primeramente, se medirán los parámetros eléctricos, para luego determinar los mecánicos y por último las 2 constantes.

RESISTENCIA E INDUCTANCIA DE ARMADURA

Al analizar las ecuaciones de funcionamiento, se observa en la tercera, que si se retiene el eje mecánico con algún freno tal que no gire, no se produce la tensión contra electro motriz, denominada E_b , que se opone a la tensión de alimentación de armadura E_a . Con lo que queda un circuito formado sólo por el circuito serie de la resistencia de armadura y la inductancia de armadura alimentadas por la tensión E_a . Para determinar ambos parámetros desconocidos, se necesitan 2 pruebas diferentes:

- A) Al alimentarlo con una tensión E_a constante durante un tiempo prolongado, la tensión sobre la inductancia se reduce a cero, ya que depende de la derivada de la corriente I_a , la cual será constante. Por lo tanto, al medir la tensión E_a aplicada con un voltímetro y la corriente I_a demandada con un amperímetro, el cociente entre ambas mediciones daría la resistencia de armadura R_a
- B) Conociendo R_a , se alimenta al motor con una tensión rectangular periódica, donde se observa el tiempo de establecimiento en cada pulso, midiendo la tensión sobre una resistencia shunt en serie, el cual es el cociente entre la inductancia L_a y la resistencia R_a (T_a , constante de tiempo eléctrica).

Cabe destacar que estos ensayos se deben realizar con la tensión reducida, normalmente a un décimo de la tensión nominal de trabajo, ya que al bloquear el eje mecánico, el motor no puede desarrollar potencia mecánica y toda la potencia eléctrica que consuma la deberá disipar, haciendo que las condiciones de trabajo resulten peligrosas y no sean parecidas a las de trabajo nominal. Al alimentarlo con un décimo de la tensión, los parámetros internos prácticamente son los mismos que se tendrán en las condiciones de trabajo nominal, con lo cual la corriente demandada será también de un décimo de la nominal, resultando en un consumo de potencia de 100 veces menor que la potencia nominal, implicando que no haya riesgos al hacerlo trabajar con estas condiciones durante el corto tiempo que requieren las mediciones. Otra consideración a tener en cuenta, es que si se utilizase un multímetro para medir la resistencia entre los bornes de la armadura, lo que se mediría sería sólo la resistencia de los cables, siendo ésta sólo una parte de la resistencia de armadura (depende de las condiciones de trabajo), obteniendo un dato erróneo.

Cálculo de la resistencia de armadura

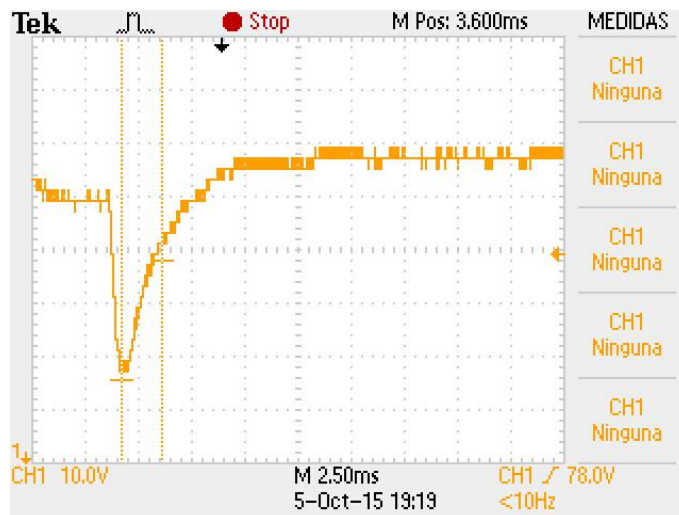


$$R_a = 3.71\text{V}/1.397\text{A} \Rightarrow \boxed{R_a = 2.67\Omega}$$

Ilustración 4: Corriente de armadura (izq) y tensión de armadura (der) para determinar R_a .

Observación: El signo negativo del amperímetro sólo indica la forma de conexión de las puntas.

Cálculo de la inductancia de armadura



$$\begin{cases} T_a' = 1.9\text{mSegundos} \\ T_a' = \frac{L_a}{R_a + R_x} \\ R_x = 9.43\Omega \end{cases}$$

$$\boxed{L_a = 23 * 10^{-3}\text{Hy}}$$

$$\boxed{T_a = 8.7 * 10^{-3}\text{S}}$$

Ilustración 5: Tiempo de establecimiento eléctrico T_a .

Constante voltimétrica K_b y torquimétrica K_t

Liberando el eje mecánico y haciendo girar el motor a la velocidad nominal en régimen permanente, desaparecen L_a y J_m (no aportan por ser en régimen permanente), quedando sólo R_a (ya medida) y B_m . Para medir la velocidad angular se podría usar el tacómetro, pero todavía no se conoce la constante de conversión, con lo que se debe usar el disco estroboscópico. La forma de uso es la siguiente:

Sabiendo que la frecuencia de la iluminación es de 50 Hertz, se debe usar el círculo que representa los 50 Hertz (el menor que está ubicado en el interior), variando la velocidad de giro del motor hasta ver que el círculo quede estático. Según la indicación del dispositivo, da un ciclo por segundo a 50Hz. Esto quiere decir que al verlo en esta condición, la frecuencia de giro es de 1Hz. Por lo tanto, al multiplicar esto por 2π , se conoce la velocidad angular del motor luego de la caja reductora, dando que la velocidad de giro nominal del motor es de $2\pi \cdot 1\text{Hz} \cdot 30$, dando por resultado:

$$\boxed{W_n = 188.5 \text{ rad/s}}$$

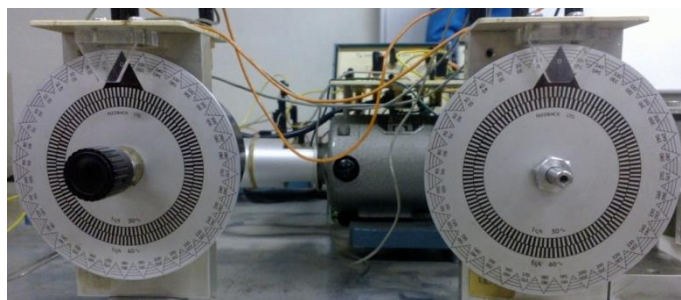


Ilustración 6: Vista frontal de los potenciómetros de referencia (izquierda) y de realimentación (derecha).

Con el motor girando a velocidad nominal, se mide mediante un voltímetro la tensión E_a inyectada y la corriente I_a demandada (al igual que para determinar la resistencia R_a en pasos anteriores), para obtener la tensión contra electro motriz E_b , según la ecuación 1° de funcionamiento, para luego calcular la constante K_b con la ecuación 3°.

Cálculo de la constante voltimétrica



$$\begin{cases} E_b = 4.89\text{V} - 2.67\Omega \cdot 0.935\text{A} \\ K_b = W_n/E_b \end{cases}$$

$$\boxed{K_b = 12 \cdot 10^{-3} \text{ VS}}$$

Ilustración 7: Corriente de armadura (izq) y tensión de armadura (der) para determinar las constantes internas del motor.

$$\boxed{K_t = 12 \cdot 10^{-3} \text{ Nm/A}}$$

Observación: Si se trabaja en el Sistema Internacional, el módulo de ambas constantes es el mismo.

Inercia y rozamiento mecánicos

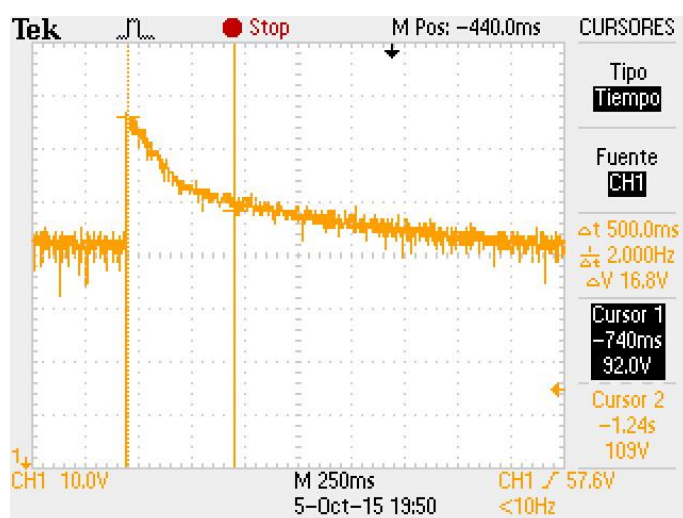
En base a la misma medición que se realizó para obtener las constantes, se puede calcular el rozamiento mecánico B_m , sabiendo que la potencia mecánica que se desarrolla se disipa completamente sobre dicho parámetro, y la potencia mecánica es igual a la potencia eléctrica, la cual se calcula como la potencia eléctrica total consumida menos la potencia sobre la resistencia R_a . Con lo que queda que:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Pelec total} = 4.89\text{V} * 0.935\text{A} \\ \text{Pelec sobre } R_a = 2.67\Omega * (0.935\text{A})^2 \\ \text{Pmecánica} = \text{Pelec total} - \text{Pelec sobre } R_a \\ \text{Pmecánica} = B_m * (188.5\text{rad/S})^2 \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{Pelec total} = 4.57215\text{W} \\ \text{Pelec sobre } R_a = 2.3342\text{W} \\ \text{Pmecánica} = 2.2379\text{W} \\ B_m = 2.2379\text{W}/(188.5\text{rad/S})^2 \end{array} \right.$$

$$\boxed{B_m = 63 * 10^{-6} \text{NmS}}$$

Para el cálculo del momento de inercia J_m , se debería aplicar una corriente de forma rectangular pulsante como se hizo para medir la inductancia de armadura L_a y medir el tiempo de establecimiento mecánico T_m . Aunque esto no es posible ya que la corriente de armadura es producto de la respuesta del circuito a la tensión aplicada E_a , que es la variable que se puede inyectar, dando por resultado que haya un tiempo de establecimiento eléctrico y otro mecánico. Sin embargo, debido a la diferencia de magnitudes entre ambos tiempos, siendo el eléctrico varios órdenes de magnitud menor al mecánico, el tiempo de establecimiento de la corriente I_a es despreciable, con lo cual se puede suponer que al aplicar una tensión de armadura rectangular pulsante con un período tal que permita alcanzar el régimen permanente, la forma de la corriente de armadura también será una rectangular pulsante, pudiendo entonces medir el tiempo de establecimiento para obtener el momento de inercia J_m , conociendo el rozamiento B_m . La forma de medir el tiempo de establecimiento es, al igual que antes, midiendo la tensión sobre una resistencia shunt en serie.

Cálculo del momento de inercia



$$\left\{ \begin{array}{l} T_m = 500\text{ms} \\ T_m = \frac{J_m}{B_m} \end{array} \right.$$

$$\boxed{J_m = 31.5 * 10^{-6} \text{NmS}^2}$$

$$\boxed{T_m = 0.5\text{S}}$$

Ilustración 8: Tiempo de establecimiento mecánico T_m .

A partir de este punto, ya se tienen medidos todos los parámetros referentes al motor. Resta el análisis de los componentes del resto del circuito:

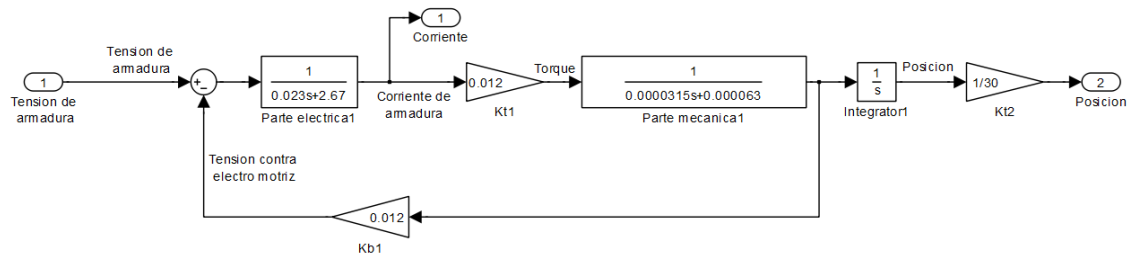


Ilustración 9: Diagrama de bloques de la planta del motor.

OBTENCIÓN DEL RESTO DE LOS PARÁMETROS DEL CIRCUITO

Sumador y amplificador

Para continuar con el resto de las mediciones, se procede a la conexión del circuito como un seguidor de posición, según se describe en la figura 1.

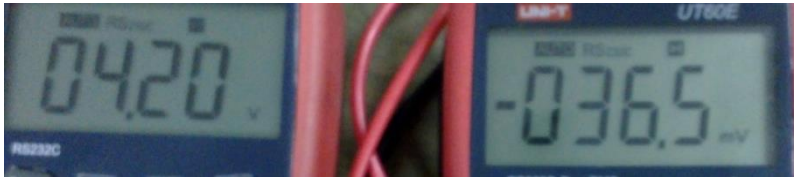
Para sumar las señales, se utiliza un circuito sumador inversor en base a un operacional y varias resistencias. Como todas las resistencias empleadas son del mismo valor, la ganancia del sumador es unitaria. Lo que hay que tener en cuenta, es que el circuito en sí sólo suma las señales de entrada, no realiza la resta de la referencia contra el sensado de la salida, que es lo que se quiere. Por lo tanto, lo que se debe hacer, es invertir la tensión de alimentación de alguno de los 2 potenciómetros, tal que una de las 2 señales quede negativa respecto de la otra y se produzca efectivamente la resta, para obtener la señal de error.



Ilustración 10: Circuito sumador

La tensión de error a la salida del sumador pasa por una cadena amplificadora, compuesta por algunos amplificadores, para llevarla al nivel de tensión que se requiera para alimentar al motor. Por lo tanto, colocando un voltímetro a la salida del sumador y otro en los bornes de conexión del motor, se puede realizar el cociente de ambos valores para obtener la ganancia total de la cadena.

Cálculo de la ganancia de los amplificadores



$$\text{Ganancia} = 4.2\text{V}/0.0365\text{V} \Rightarrow$$

$$\text{Ganancia} = 115\text{veces}$$

Ilustración 11: Tensión de armadura (izq) y tensión de error (der) para determinar la ganancia de la cadena amplificadora.

El valor de tensión de armadura medido, 4.2v en este caso, es la tensión en bornes del puente H intercalado luego del amplificador para poder controlar el motor.

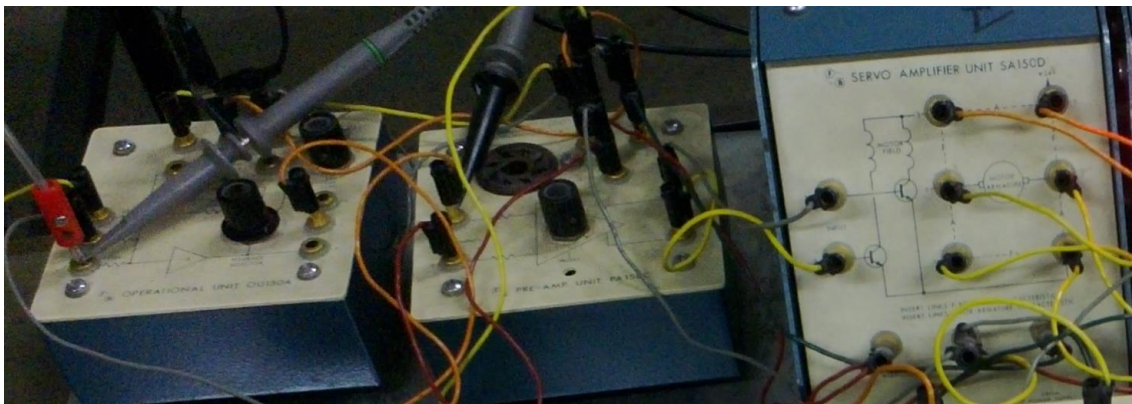


Ilustración 12: Sumador (izq), amplificador (centro) y puente H (der) para controlar el motor.

Potenciómetros de referencia y de realimentación

Por cuestiones de funcionamiento, los potenciómetros no pueden tener un recorrido completo de 360° , sino que tienen un rango útil menor. Midiendo esa variación de ángulos recorridos respecto del rango de tensiones en que puede variar, da la constante de conversión.

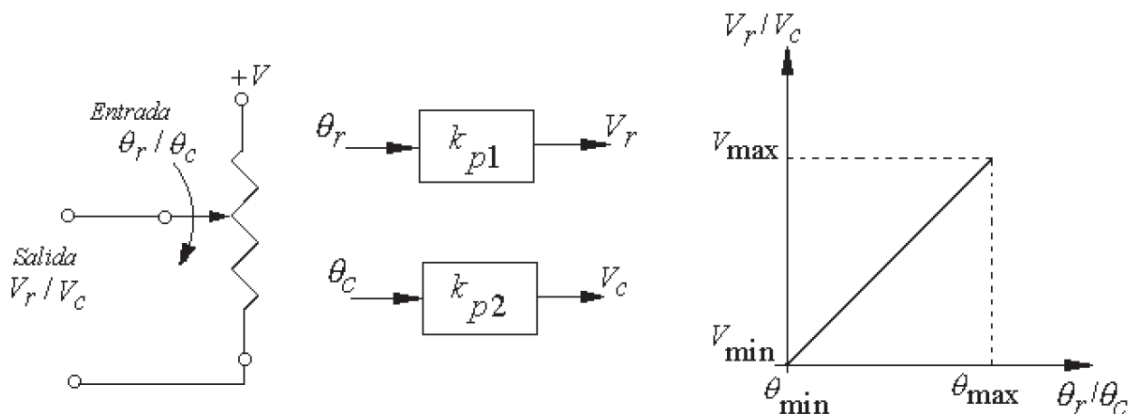


Ilustración 13: Funcionamiento de los potenciómetros.

Las mediciones dan por resultado:

Zonas de trabajo de los potenciómetros

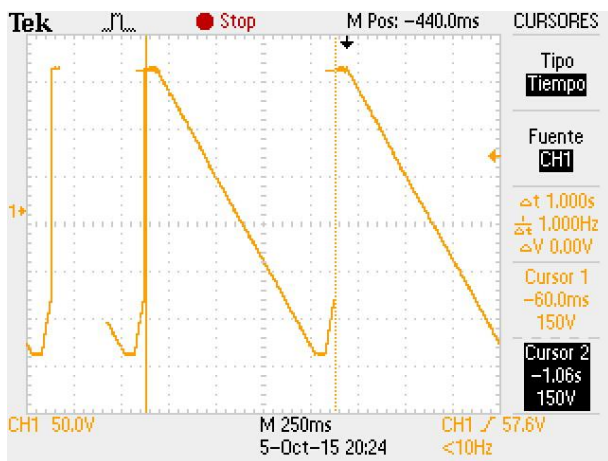


Ilustración 14: Rango de tensiones útiles.

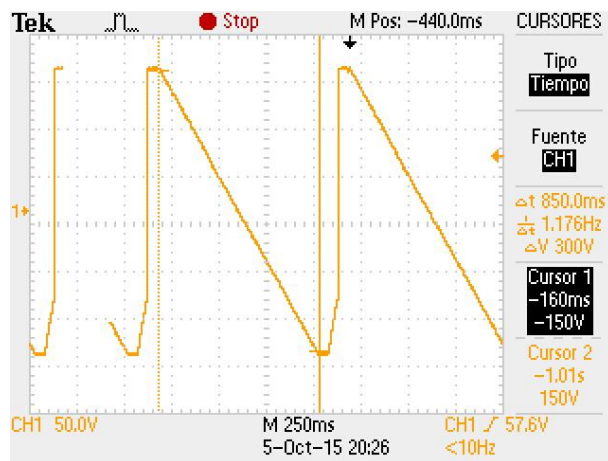


Ilustración 15: Rango de ángulos válidos.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Rango de ángulos válidos} = 360^\circ \cdot 0.85/1 \\ \text{Rango de tensión total} = 30V \\ K_{pot} = \frac{\text{Rango de tensión total}}{\text{Rango de ángulos válidos}} \end{array} \right.$$

=>

$$\boxed{K_{pot1} = K_{pot2} = 5.6 \text{ rad/V}}$$

Como el sistema debe funcionar como un seguidor de posición, la constante de ambos potenciómetros ha de ser la misma, aunque constructivamente sean diferentes (el potenciómetro de referencia tiene un tope mientras que el de realimentación no). Por lo que con la medición de uno, se obtiene el otro también.

Constante de conversión del tacómetro

Haciendo funcionar el motor a la velocidad nominal (mediante la utilización del disco estroboscópico), se mide la tensión media de salida del tacómetro, con las cuales se calcula la constante de conversión como:

$$K_{tac} * 188.5 \text{ rad/S} = 4.15 \text{ V} \quad \Rightarrow \quad \boxed{K_{tac} = 22 * 10^{-3} \text{ V/S}}$$

ESQUEMA FINAL EN BASE A LAS MEDICIONES

Motor a lazo abierto

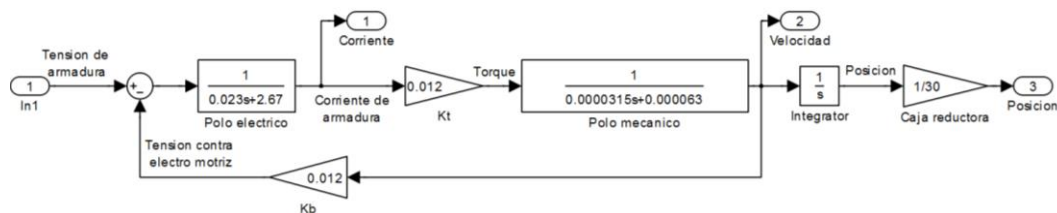


Ilustración 16: Planta equivalente del servomotor ensayado.

Transferencia a lazo abierto $M(s)$ del servomotor de corriente continua ensayado:

$$M(s) = \frac{0.012}{2.174e - 5 s^2 + 0.002567 s + 0.009366}$$

Seguidor de posición

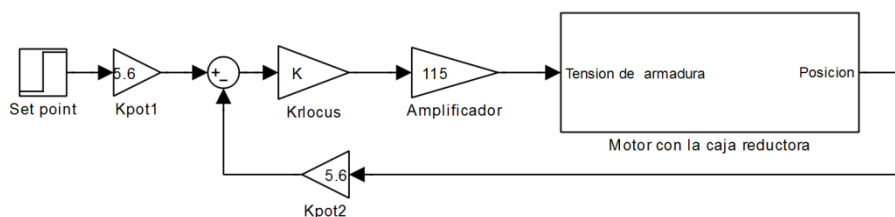


Ilustración 17: Seguidor de posición.

Transferencia a lazo cerrado $M(s)$ del seguidor de posición ensayado:

$$M(s) = \frac{0.001496}{2.174e - 5 s^3 + 0.002567 s^2 + 0.009366 s + 0.008676}$$

Seguidor de velocidad

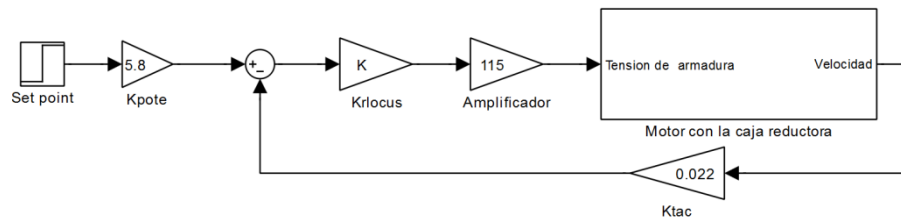


Ilustración 18: Seguidor de velocidad.

Transferencia a lazo cerrado $M(s)$ del seguidor de velocidad ensayado:

$$M(s) = \frac{0.001496}{2.174e-5 s^3 + 0.002567 s^2 + 0.009366 s + 3.291e-5}$$

COMPARACIÓN DE LOS POLOS EXACTOS CON LOS APROXIMADOS

En base al modelo equivalente del motor ensayado, se procede a calcular la ubicación de los polos del sistema:

$$M(s) = \frac{0.012}{2.174e - 5 s^2 + 0.002567 s + 0.009366}$$

Polo exacto 1	$-114,3173s^{-1}$
Polo exacto 2	$-3,7696s^{-1}$

Los polos aproximados del sistema se corresponderían con los propios del motor, es decir, con las inversas de los tiempos de establecimiento mecánico y eléctrico (Siendo éste último mucho menor que el mecánico, con lo cual la respuesta es ampliamente dependiente del polo mecánico). Con lo cual, se calculan los polos aproximados como la inversa de los T:

T eléctrico	-8,7mS
T mecánico	-0,5S

Polo aproximado 1	$-116,087s^{-1}$
Polo aproximado 2	$-2s^{-1}$

Conociendo los valores exactos y los aproximados, se realiza el cálculo del error porcentual en la utilización de los polos aproximados:

$$\text{error porcentual} = \frac{|\text{Polo aproximado} - \text{Polo exacto}|}{|\text{Polo exacto}|}$$

$$\text{error porcentual}_{\text{Polo 1}} = \frac{|-116,087 - (-114,3173)|}{|-114,3173|} \Rightarrow \text{error porcentual}_{\text{Polo 1}} = 1,548\%$$

$$\text{error porcentual}_{\text{Polo 2}} = \frac{|-2 - (-3,7696)|}{|-3,7696|} \Rightarrow \text{error porcentual}_{\text{Polo 2}} = 46,944\%$$

Polos exactos	Polos aproximados	Error cometido
$-114,3173s^{-1}$	$-116,087s^{-1}$	1,548%
$-3,7696s^{-1}$	$-2s^{-1}$	46,944%

Como se aprecia en la comparación, el error que se comete al utilizar las aproximaciones es elevado, siendo cada vez mayor a medida que el polo esté más cerca del origen. Sin embargo, es una forma fácil y rápida que permite conocer la dinámica del sistema, siendo válida como una primera aproximación.

CONCLUSIÓN DE LAS COMPARACIONES

Analizando las salidas aproximadas y exactas para los diferentes casos, al igual que el error porcentual que se comete, se puede afirmar que la aproximación que se obtiene al despreciar el polo eléctrico, debido a la diferencia respecto del polo mecánico, es válida y los resultados son aceptables.

RESUMEN DE LOS PARÁMETROS DEL MOTOR ENSAYADO

Parámetro/Componente	Nomenclatura	Valor obtenido	Unidad
Resistencia de armadura	Ra	2.67	[Ω]
Inductancia de armadura	La	$23 * 10^{-3}$	[Hy]
Constante de tiempo eléctrica	Ta	$8.7 * 10^{-3}$	[S]
Inercia mecánica	Jm	$31.5 * 10^{-6}$	[NmS^2]
Rozamiento mecánico	Bm	$63 * 10^{-6}$	[NmS]
Constante de tiempo mecánica	Tm	0.5	[S]
Constante de torque del motor	Kt	$12 * 10^{-3}$	[Nm/A]
Constante voltimétrica del motor	Kb	$12 * 10^{-3}$	[VS]
Caja reductora	H	1:30	[veces]
Potenciómetro de referencia	Kpot1	5.6	[rad/V]
Potenciómetro de realimentación	Kpot2	5.6	[rad/V]
Cadena amplificadora	A	115	[veces]
Ganancia del lugar de raíces	K	$0 < k < 1$	[veces]
Constante taquimétrica	Ktac	$22 * 10^{-3}$	[VS]

Índice de figuras

<i>Ilustración 1: Diagramas de bloques para el control de posición angular.</i>	3
<i>Ilustración 2: Diagrama de bloques para el control de velocidad angular.</i>	4
<i>Ilustración 3: Modelo equivalente analógico del motor de corriente continua.</i>	4
<i>Ilustración 4: Corriente de armadura (izq) y tensión de armadura (der).</i>	6
<i>Ilustración 5: Tiempo de establecimiento eléctrico T_a.</i>	6
<i>Ilustración 6: Vista frontal de los potenciómetros de referencia (izquierda) y de realimentación (derecha).</i>	7
<i>Ilustración 7: Corriente de armadura (izq) y tensión de armadura (der) para</i>	7
<i>Ilustración 8: Tiempo de establecimiento mecánico T_m.</i>	8
<i>Ilustración 9: Diagrama de bloques de la planta del motor.</i>	9
<i>Ilustración 10: Circuito sumador.</i>	10
<i>Ilustración 11: Tensión de armadura (izq) y tensión de error (der) para determinar</i>	11
<i>Ilustración 12: Sumador (izq), amplificador (centro) y puente H (der) para controlar el motor.</i>	11
<i>Ilustración 13: Funcionamiento de los potenciómetros.</i>	12
<i>Ilustración 14: Rango de tensiones útiles.</i>	12
<i>Ilustración 15: Rango de ángulos válidos.</i>	12
<i>Ilustración 16: Planta equivalente del servomotor ensayado.</i>	14
<i>Ilustración 17: Seguidor de posición.</i>	14
<i>Ilustración 18: Seguidor de velocidad.</i>	15