

Proyecto final de Control y Sistemas

Rodrigo Goñi
gonirodrigoivan@hotmail.com

Control y Sistemas
Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de Cuyo

Mendoza, Argentina

Febrero 2020

Resumen

En el siguiente proyecto se realiza el modelado completo de un motor de corriente continua de imanes permanentes, el sensor de corriente, el modulador de tensión, la caja reductora y la señal de corriente. Además se implementa el diseño de un controlador PID discreto de movimiento en cascada con un modulador de torque, con el objetivo de controlar el movimiento de las articulaciones de un brazo robótico de 4 g.d.l.

2.1. Modelo de la planta

2.1.1. Planta motor DC

Para el modelo del motor DC se utiliza como referencia los parámetros del motor DPP680 Electro-Craft DirectPower plus brush motor [1]. A continuación se detalla el modelo matemático a del motor DC, función de transferencia y lazo del motor de forma desagregada.

1. Variables de estado:

$$x(t) = \begin{bmatrix} \theta(t) \\ \omega(t) \\ i_a(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde $\theta(t)$ y $\omega(t)$ son la posición y velocidad del motor y $i_a(t)$ es la corriente.

$$y(t) = \begin{bmatrix} q(t) \\ q_p(t) \\ i_a(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Donde $q(t)$ y $q_p(t)$ son la posición y velocidad del articulares y $i_a(t)$ es la corriente.

2. Entradas:

$$u(t) = \begin{bmatrix} u_a(t) \\ T_l(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Donde $u_a(t)$ y $T_l(t)$ son la tensión de entrada al motor y el torque de carga.

3. Matriz de estado:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{b}{J_l} & -\frac{K_t}{L_a} \\ 0 & -\frac{K_t}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \quad (4)$$

4. Matriz de entrada:

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{r \cdot J_l} \\ \frac{1}{L_a} & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

5. Matriz de salidas:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

6. Modelo matemático de sistema:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t) & x(0) = x_0 \\ y(t) = C \cdot x(t) & \dot{x}(0) = \dot{x}_0 \end{cases} \quad (7)$$

En la siguiente imagen se puede ver el lazo desagregado de planta:

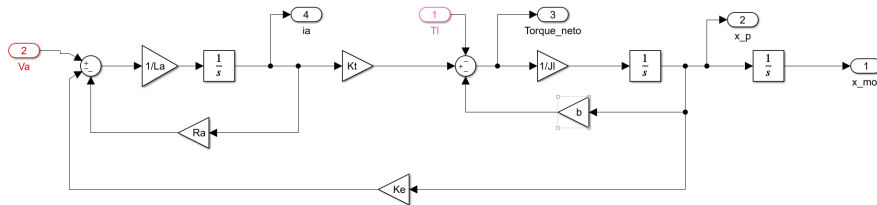


Figura 2: Lazo desagregado motor

Se obtiene la función de transferencia:

$$G(s) = \left(\frac{K_t}{(J_l L_a) s^3 + (L_a b + J_l R_a) s^2 + (R_a b + K_e K_t) s} \quad \frac{(-L_a) s - R_a}{(J_l L_a) s^3 + (L_a b + J_l R_a) s^2 + (R_a b + K_e K_t) s} \right) \quad (8)$$

2.1.2. Modelado ruido electromagnético

El modelado del ruido eléctrico se dividió en tres partes el ruido generado por la corriente eléctrica del sistema, el ruido que se adiciona en el sensor de corriente y el ruido generado por el sensor encoder.

1. **Ruido electromagnético general:** Se simuló con ayuda del bloque AWGN o Add white Gaussian noise, que permite agregar ruido gaussiano al sistema en tiempo real, con la ayuda de una entrada donde se coloca la varianza de la señal. Para calcular la varianza se utiliza el bloque Moving Variance que permite calcular la varianza de la señal por ventaneo. En la siguiente imagen se mostrara el lazo utilizado:

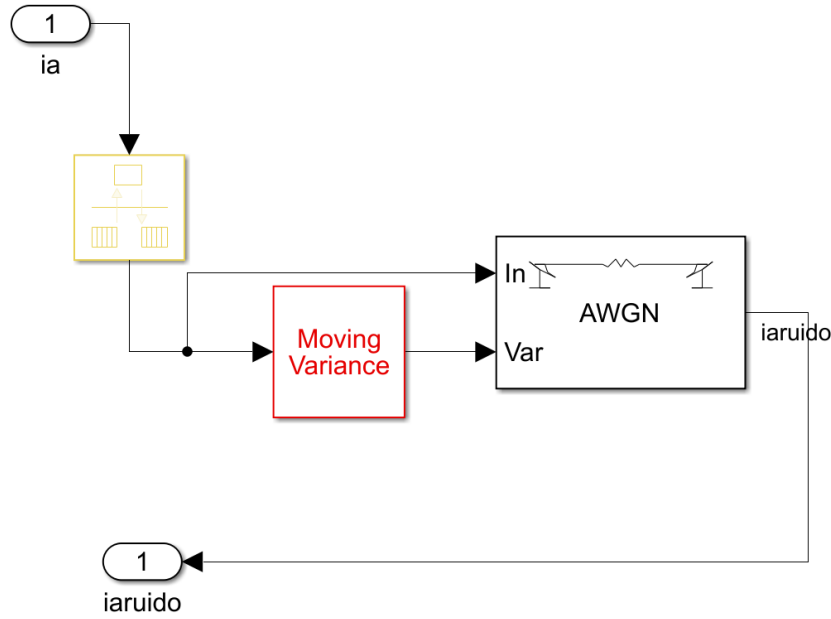


Figura 3: Lazo Ruido E.M.

2. **Ruido electromagnético sensores:** Se utiliza el bloque AWGN nuevamente pero con distintas configuraciones.

- a) Encoder: en este caso se configura para que el ruido dependa de varianza constante donde esta es igual a:

$$s^2 = \left(\frac{1}{\text{resolucion}} \cdot \frac{\pi}{180} \right)^2 \quad (9)$$

- b) Sensor corriente: aquí el bloque se configura a partir del SNR, donde se contaba con los datos del sensor en el caso más desfavorable, donde el SNR es igual a:

$$SNR = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{2100}{0,044} V \right) \quad (10)$$

2.1.3. Modelado caja reductora

En el modelado de la caja reductora se tiene en consideración dos fenómenos además de la reducción. Primero se considera el backlash como el mayor retardo posible en la propagación de la señal, según las características de la caja y para su modelado se utiliza un bloque de retardo de señal. Segundo se considera el efecto elástico de la caja y se modela como un resorte torsional. En la siguiente imagen se presenta el modelo de la caja reductora:

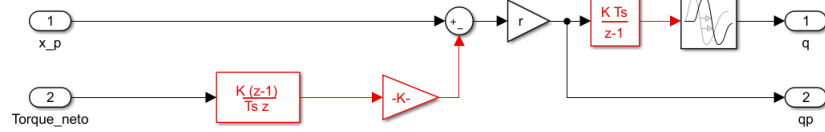


Figura 4: Modelo caja reductora

2.1.4. Modelado modulador de tensión

En el modelo del modulador de tensión se considera la saturación en tensión y la máxima frecuencia en la salida. Se utiliza como referencia el RoboClaw 2x60AHV Dual Channel Motor Controller [2] para los parámetros del modelo. En la siguiente imagen se muestra el modelo del modulador de tensión.

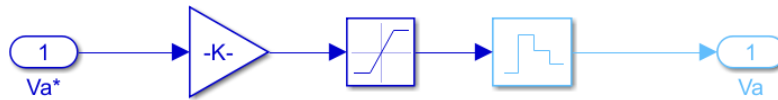


Figura 5: Modelo modulador de tensión

2.1.5. Modelado sensor de corriente

En el modelado del sensor de corriente se tiene en cuenta el retraso del sensor, el filtrado pasa bajo, y el ruido. Como referencia para los parámetros del mismo se utiliza el sensor Allegro ACS712[3]. En la siguiente imagen se puede ver el modelo del sensor de corriente.

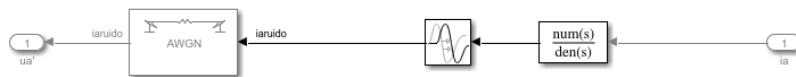


Figura 6: Modelos sensor Corriente

2.2. Controlador

Se desarrolla un controlador discreto el cual fue diseñado para poder correr sobre un MPU arm mpu cortex m4, en este se tiene el lazo PID que esta en cascada con un lazo de modulación de torque y un lazo observador de posición para la estimación en de la velocidad. Dichos lazos se simulan en distintas frecuencias, para ello se utilizan los bloques rate transition. En la siguiente figura se muestra el modelo completo del controlador y las frecuencias de simulación:

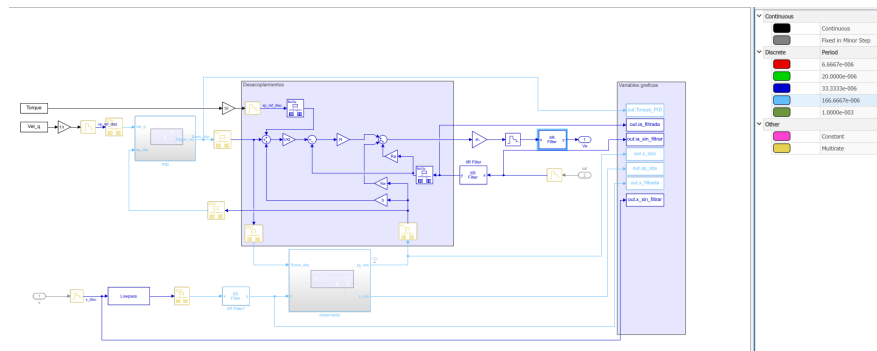


Figura 7: Modelo controlador completo

En el controlador se realizan las siguientes tareas:

1. Lectura de entradas: Para ello se utilizaron retenes de orden cero para discretear las entradas al controlador.
2. Filtrado de la señal: Se utilizan filtros IIR del dominio del tiempo, ya que este sistema esta pensado para correr en un microcontrolador, que tiene limitación de memoria. Para la implementación se utilizaron los bloques IIR FILTER que permiten colocar el parámetro 'a' de la

formula:

$$y_k = a.x_k + (1 - a).y_{k-1} \quad (11)$$

Donde y_k es la salida del bloque y x_k es la entrada.

Estos filtros tiene por funcionalidad suavizar la señal.

3. Control de torque: Se controla el motor por torque para que se pueda controlar la dinámica del motor, con esto se permite tener un control preciso y robusto del sistema.

Para realizar el control por torque es necesario desacoplar los lazos de realimentación del motor y generar un lazo de control corriente. Para hacer este lazo de control de corriente se define la ganancia R . Dicha ganancia permite definir la frecuencia de corte del lazo de corriente y el tiempo de respuesta. En nuestro caso se define:

$$R = 3,8\Omega \quad (12)$$

Quedando así la frecuencia de corte como:

$$f_c = \frac{R}{2.\pi.L_a} \quad (13)$$

Y el tiempo de respuesta como:

$$\tau = \frac{R}{L_a} \quad (14)$$

Para que el control de torque sea posible el sistema tiene que ser controlable, por ello se evalúa la controlabilidad del sistema:

$$C = [B \quad A.B \quad A^2.B] \quad (15)$$

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{K_t}{JL_a} \\ 0 & \frac{K_t}{JL_a} & -\frac{\frac{K_t}{JL_a} + \frac{K_t R_a}{JL_a}}{JL_a^2} \\ \frac{1}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a^2} & \frac{\frac{R_a^2}{L_a^2} - \frac{K_e K_t}{JL_a}}{L_a} \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$rango(C) = 3 \quad (17)$$

Por lo que se puede concluir que el sistema es controlable.

En la siguiente imagen se muestra el control por torque y los desacoplamientos.

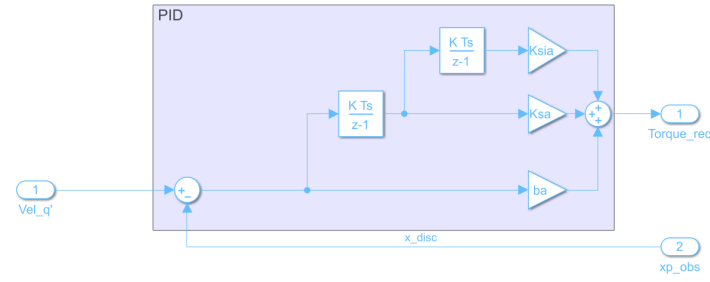


Figura 9: Lazo de PID

5. Observador: En el sistema solamente se cuenta con un sensor de posición encoder, por lo cual es necesario estimar la velocidad. Debido a ello se incorpora al controlador un observador de estado mejorado.

Primero se verifica la observabilidad del sistema desde la posición:

$$O = \begin{bmatrix} C \\ C.A \\ C.A^2 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$O = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{b}{Jl} & \frac{Kt}{Jl} \end{pmatrix} \quad (23)$$

$$rango(O) = 3 \quad (24)$$

Se verifica que el sistema es observable. En el trabajo de "Proyecto Global Integrador: Control de Accionamiento de CA con Motor Síncrono de Imanes Permanentes" [4] se muestra que agregando un integrador al observador se corrigen el error de estado estacionario. Por lo que se agrega el un integrador al observador.

Se definen los parámetros del observador mediante el método de asignación de polos, para ello se define la posición de los polos en $\omega_o = 3200 \frac{rad}{s}$ quedando el resto de parámetros definidos:

$$Kto = 1200 \quad (25)$$

$$Kwo = 480000; \quad (26)$$

$$B = Jl * 64000000; \quad (27)$$

En la siguiente imagen se muestra el lazo observador:

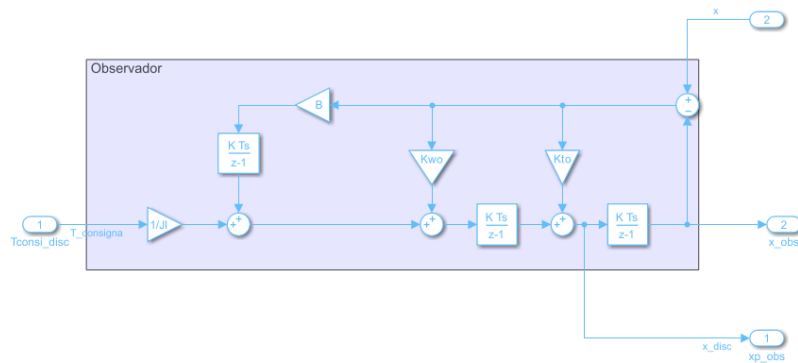


Figura 10: Lazo de Observador

3. Resultados

Se mostraran los resultados a continuación:

1. Tensiones: En la siguiente gráfica se pueden observar las tensiones de salida del controlador y salida del modulador de tensión que es la tensión de entrada al motor:

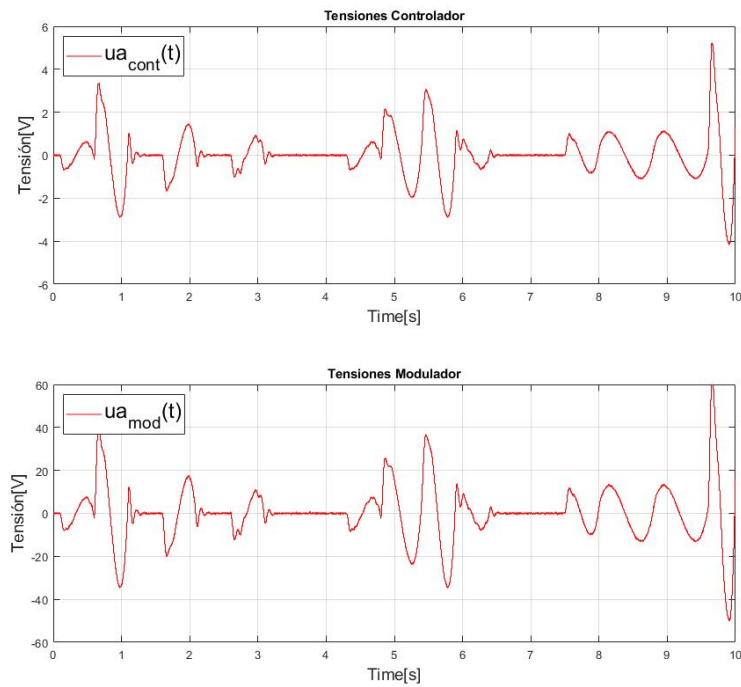


Figura 11: Tensiones en el sistema

2. Corrientes: Aquí se puede observar las corrientes de salida de motor y como se adiciona ruido

electromagnético. También se muestra como la corriente llega al filtro IIR y como este tiene efecto sobre la misma.

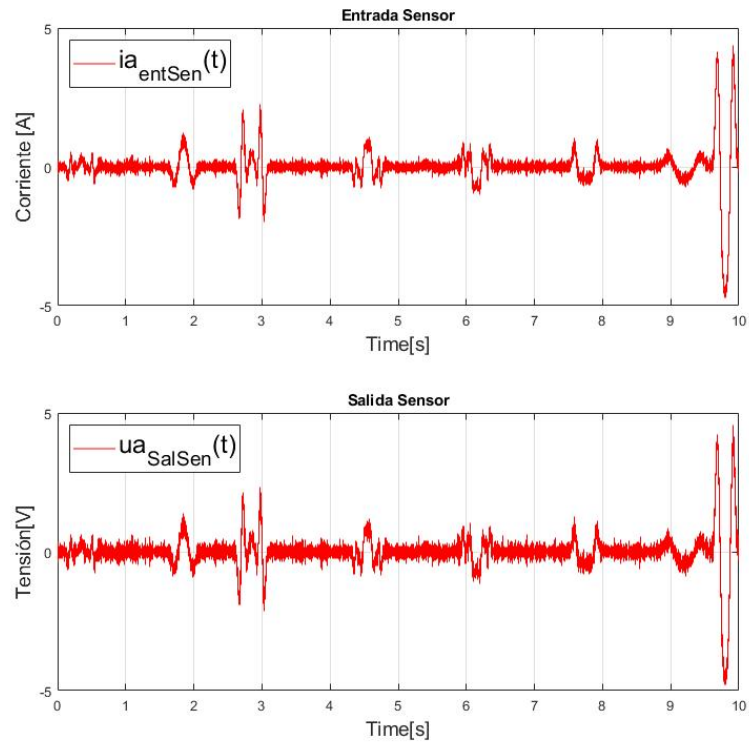


Figura 12: Corriente en el sistema

3. Posición: En este gráfico podemos observar las posiciones del motor en la salida del motor y con el ruido del encoder. Además también podemos ver el efecto del filtro IIR.

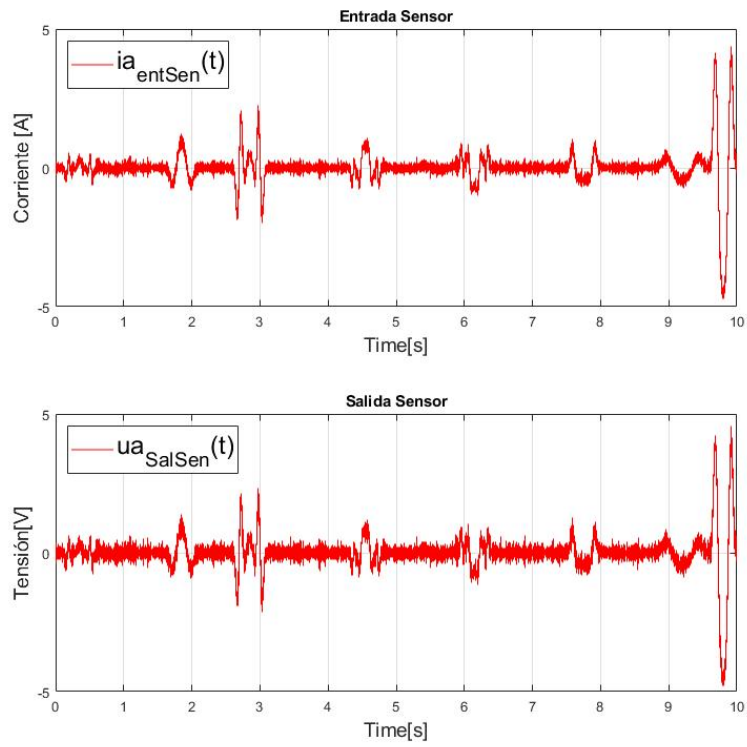


Figura 13: Corriente en el sistema

4. Sensor: En la siguiente gráfica se podemos ver la entrada y la salida del sensor.

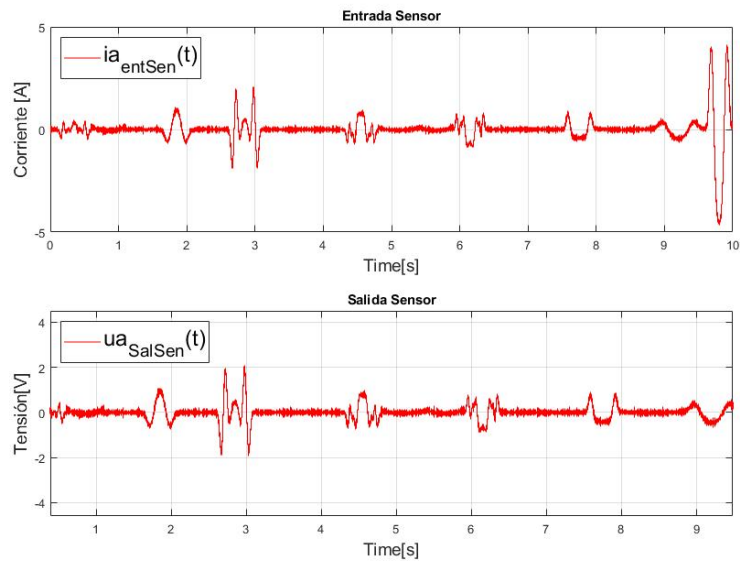


Figura 14: Entrada y salida sensor

5. Sensor: En la siguiente gráfica podemos ver la entrada y la salida del PID.

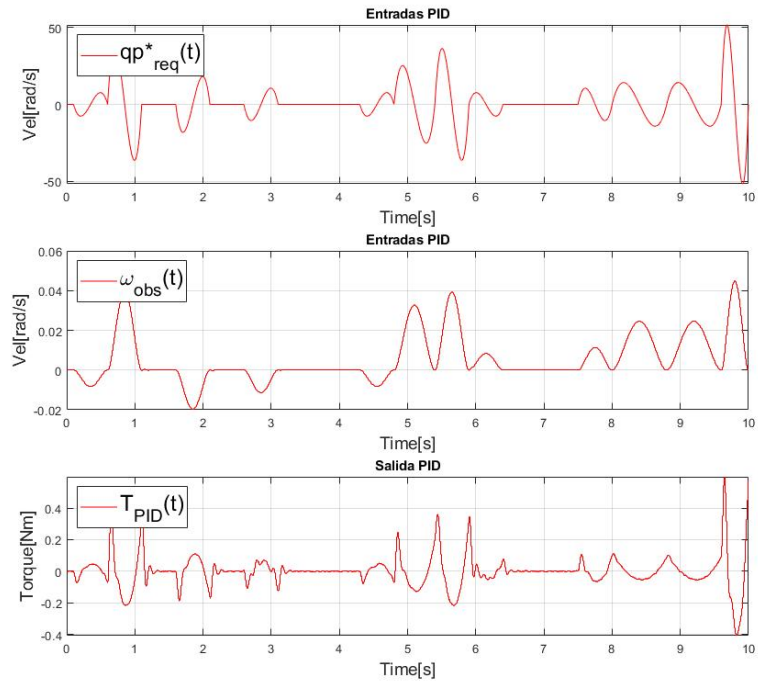


Figura 15: Entrada y salida PID

6. Observador: En la siguiente gráfica podemos ver las entradas y las salidas del observador.

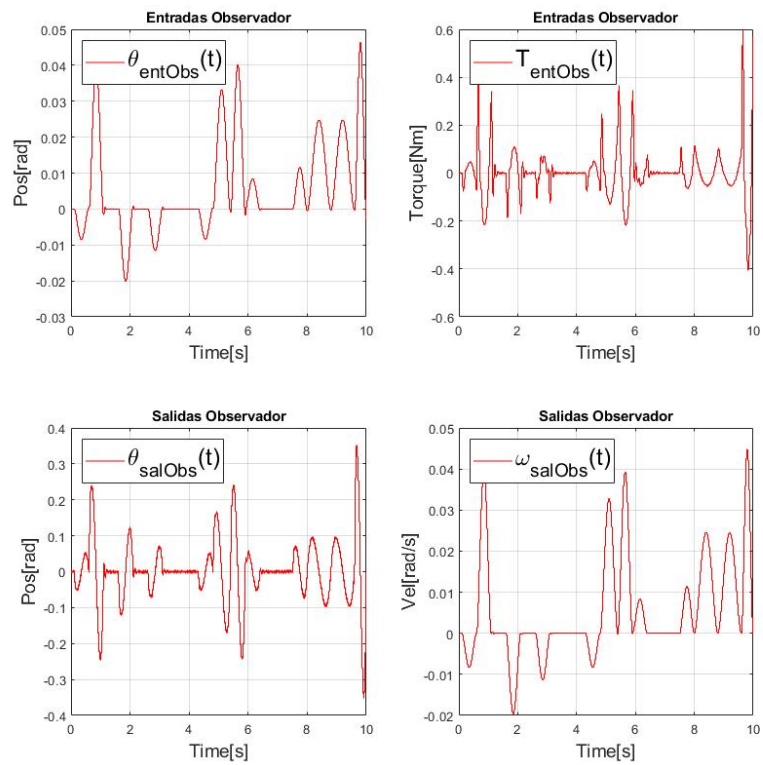


Figura 16: Entradas y salidas observador

7. Salidas articulares: En la siguiente gráfica podemos ver la posición y velocidad articular. Cabe destacar que por mas que se logro controlar el sistema no llega a tener la dinámica necesaria en la aplicación.
8. Observador: En la siguiente gráfica podemos ver las entradas y las saldáis del observador.

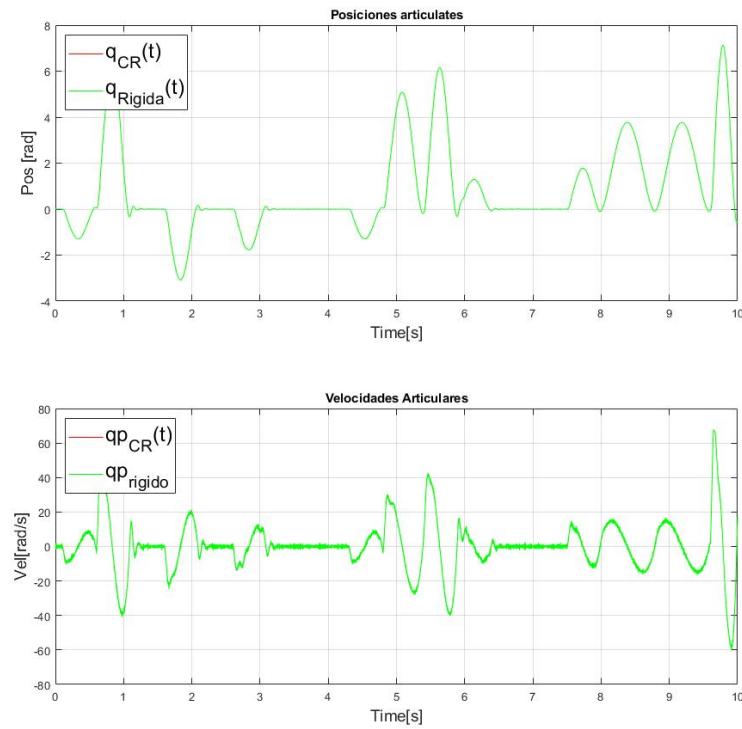


Figura 17: Posición y velocidad articular

4. Conclusión

Cabe destacar que, a pesar de, los resultados de control con el motor usado no son lo deseado, se logro desarrollar una plataforma donde se pueden probar las distintas partes del sistema motor, cambiar cada parte del sistema y someter a pruebas de simulación dicha parte, por ejemplo un cambio de motor.

Es bueno también remarcar que, tanto ruido electromagnético como el ruido de cuantización en los controladores empeora significativamente el control, siendo muy necesario la implementación de filtros.

Este trabajo se utilizara a futuro como plataforma de desarrollo para lograr la selección y diseño de los motores de un brazo robótico de 4 GDL serie para el proyecto final de estudio.

Bibliografía

Referencias

- [1] ElectroCraft, Inc. Dpp680 electrocraft directpower™ plusbrush motor. www.electrocraft.com, 2019.
- [2] Basicmicro, Inc. Roboclaw 2x60ahv dual channel motor controller data sheet. https://downloads.basicmicro.com/docs/roboclaw_datasheet_2x60AHV.pdf, 2020.
- [3] MicroSystems, Inc. Fully integrated, hall effect-based linear current sensor with 2.1 kvrms voltage isolation and a low-resistance current conductor. <https://www.allegromicro.com/~media/files/datasheets/acs712-datasheet.ashx>, 2020.
- [4] Goñi Rodrigo Deshays Octavio. Proyecto global integrador: Control de accionamiento de ca con motor síncrono de imanes permanentes. Technical report, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina, Agosto 2020.