

**Pontificia Universidad Católica del Perú**

**IEE243 – Sistemas de Control**



**Laboratorio 4**

**Control de posición con servosistema**

**Profesor:** Celso De La Cruz

**Alumno:** Yábar Reaño, Luis Salvador 20200408

**San Miguel, 02 de noviembre del 2025**

## 1. Objetivos

- Diseñar un controlador de posición utilizando un servosistema digital
- Realizar las simulaciones para comprobar el funcionamiento del control digital
- Validar que la simulación cumpla los requerimientos de bajo sobreimpulso y menor tiempo de establecimiento posible
- Implementar el controlador en el módulo XSpace y graficar las curvas obtenidas ante distintos valores de *set point*

## 2. Desarrollo del laboratorio

### 2.1 Diseño del servosistema

El modelo de la planta de velocidad del motor se obtuvo en laboratorios previos como función de transferencia.

$$\frac{292.4}{s^2 + 3.367 s}$$

Figura 1. Planta de velocidad del motor

Esta función de transferencia se puede expresar en Espacio de Estados, obteniendo las matrices A, B y C, como se muestra en la Figura 2.

$$\begin{aligned}A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -3.367 \end{bmatrix} \\B &= \begin{bmatrix} 0 \\ 292.4 \end{bmatrix} \\C &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}\end{aligned}$$

Figura 2. Planta en Espacio de Estados

Siguiendo las indicaciones del enunciado, se busca obtener un tiempo de establecimiento y un máximo sobreimpulso reducidos. Ambos requerimientos se definen en base a la experiencia previa de los laboratorios anteriores. Con la selección de estos valores, se espera obtener una respuesta rápida pero que se mantenga en los límites de voltaje para la señal de control.

$$\begin{aligned}T_{es} &= 1.5; \% 1.5 \text{ segundos} \\M_p &= 0.05; \% 5\%\end{aligned}$$

Figura 3. Requerimientos de diseño

Aplicando la fórmula mostrada en la Figura 4, se obtiene el tiempo de subida. En base a este, se puede obtener de forma empírica el periodo de muestreo a emplear para el control. En este caso, se eligió un periodo de muestreo de 100 ms, lo cual representa aproximadamente la quinta parte del tiempo de subida.

```
% Tiempo de subida
Tr = exp(fi/tan(fi))/wn
```

Figura 4. Tiempo de subida

$$Tr = 0.5598$$

$$T = 0.1$$

Tras discretizar la planta y agregar el servosistema con integrador, se realizó la prueba de controlabilidad. Se obtuvo la matriz de controlabilidad y su determinante. Dado que el determinante es distinto de cero, se afirma que la planta es controlable.

CoN =	3x3
	1.3117      3.4191      4.9241
	24.8234      17.7278      12.6605
	-1.3117      -4.7308      -9.6550

CoN = [HN GN*HN GN^2*HN]	
det_CoN = det(CoN)	det_CoN = 152.9624

Figura 5. Prueba de controlabilidad

Se define la dinámica deseada en base a los requerimientos anteriormente mencionados. Los polos se discretizan con el periodo de muestreo de 100 ms.

<b>% Dinámica deseada</b> wd = -pi*sigma/log(Mp) s1 = -sigma + wd*i1 s2 = -sigma - wd*i1 s3 = -5*sigma	<b>% Polos discretos</b> z1 = exp(T*s1) z2 = exp(T*s2) z3 = exp(T*s3)
--	--

Figura 6. Polos del servosistema

Finalmente, empleando la función *acker* de Matlab, se obtienen las ganancias del controlador.

$$K_2 = 1 \times 2$$

$$0.1508 \quad 0.0296$$

$$K_1 = 0.0339$$

Figura 7. Ganancias del servosistema

## 2.2 Simulación del Sistema

El esquema de simulación se presenta en la Figura 8. Se incluye un bloque de saturación a la salida del servosistema, para mantener la señal de control de la planta en el rango de -3 a 3 V. La referencia es el *set point* de 100 grados.

Se incluye el bloque *to workspace* para poder graficar y analizar la posición.

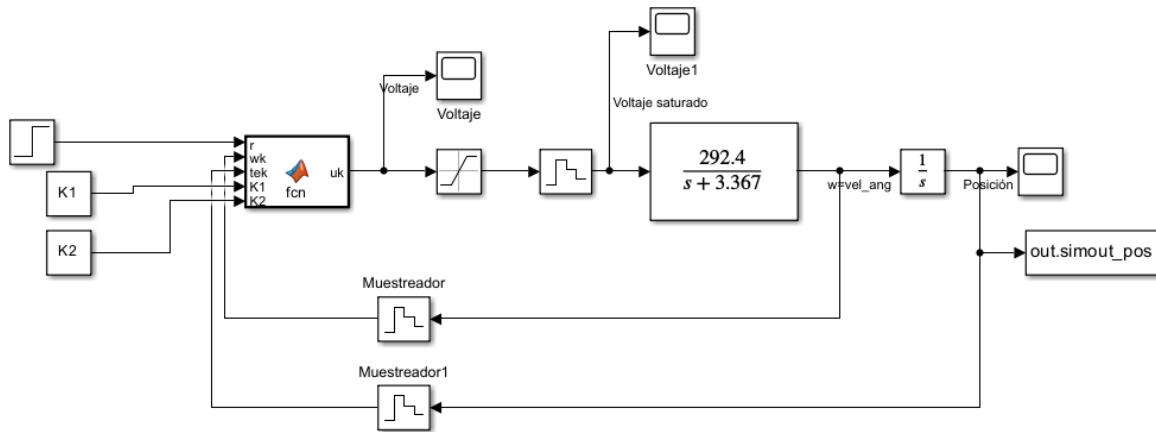


Figura 8. Esquema de simulación

En la Figura 9, se observa que la señal satura momentáneamente al inicio, por alrededor de 0.5 segundos. Se considera que esta saturación no afecta al sistema real debido a su brevedad.

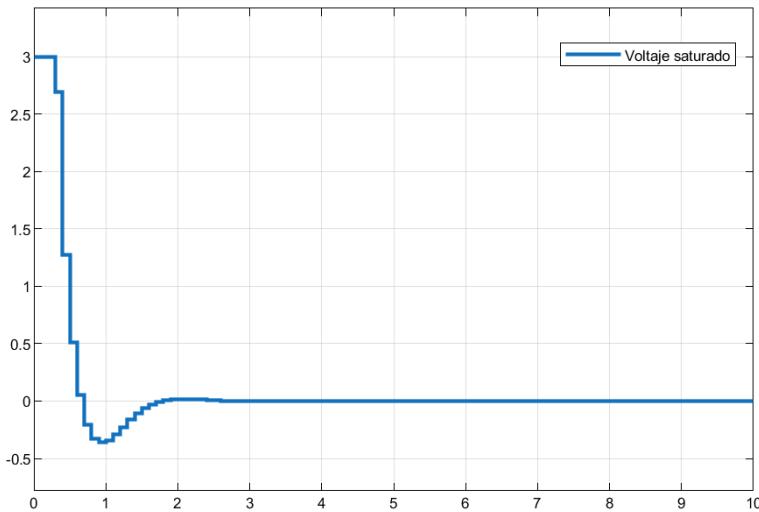


Figura 9. Señal de control (voltaje)

En la Figura 10 se presenta la respuesta del sistema a una referencia de 100 grados.

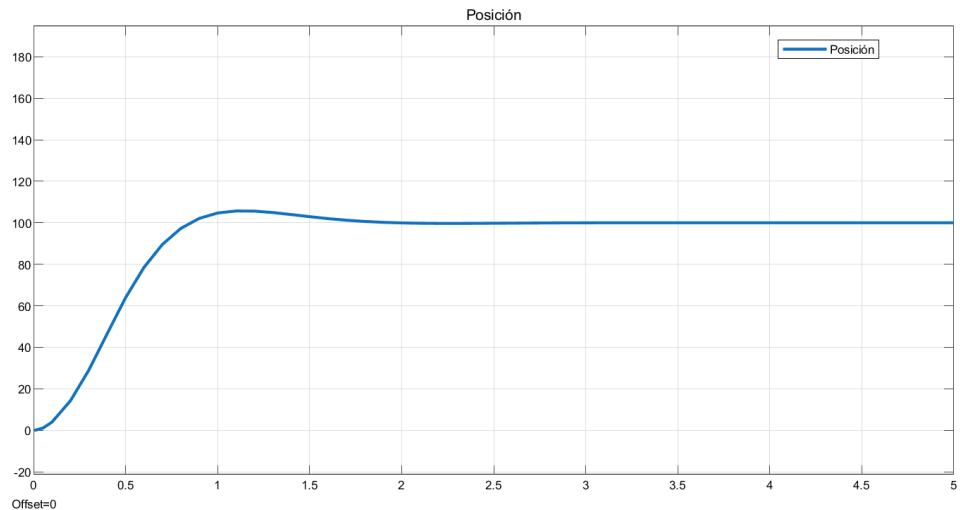


Figura 10. Respuesta del sistema (referencia de 100 grados)

La señal anterior se grafica en Matlab para analizar el sobreimpulso y tiempo de establecimiento.

De acuerdo a los cursos en la Figura 11, se tienen las siguientes mediciones:

$$Mp = \frac{105.696 - 100}{100} \cdot 100\% = 5.96\%$$

$$T_{es} = 1.6$$

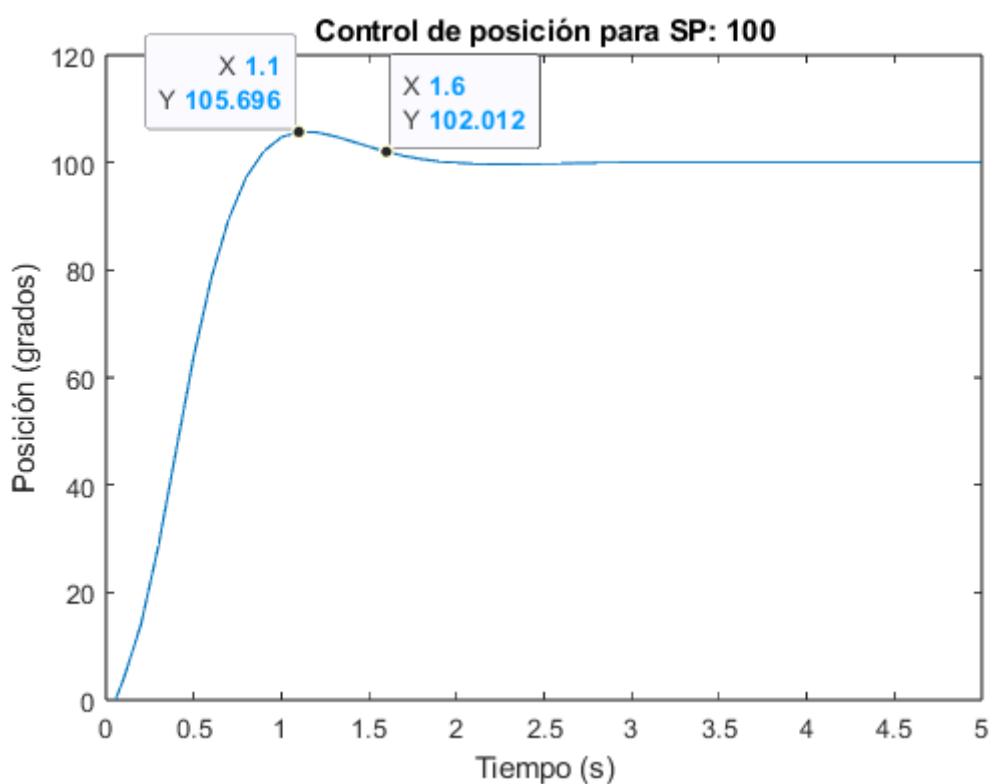


Figura 11. Características de la respuesta

## 2.3 Implementación del sistema

Se implementó el servosistema como una función en tiempo real en ESP32, con un periodo de 100 ms. La matriz K2 se dividió en dos variables para multiplicarla por los valores de posición y velocidad angular, los cuales se miden en las funciones desarrolladas en los laboratorios anteriores.

Finalmente, la función imprime el vector de tiempo, voltaje, velocidad y posición para graficar la respuesta posteriormente.

```
void servosistema(void *pvParameters) // Servosistema
{
    double t;
    double K1 = 0.0339;
    double K2_1 = 0.1508;
    double K2_2 = 0.0296;
    double vk_1 = 0; // v[k-1]
    double vk = 0;
    double ek;
    double T = 100; // 100 ms
    double uk;

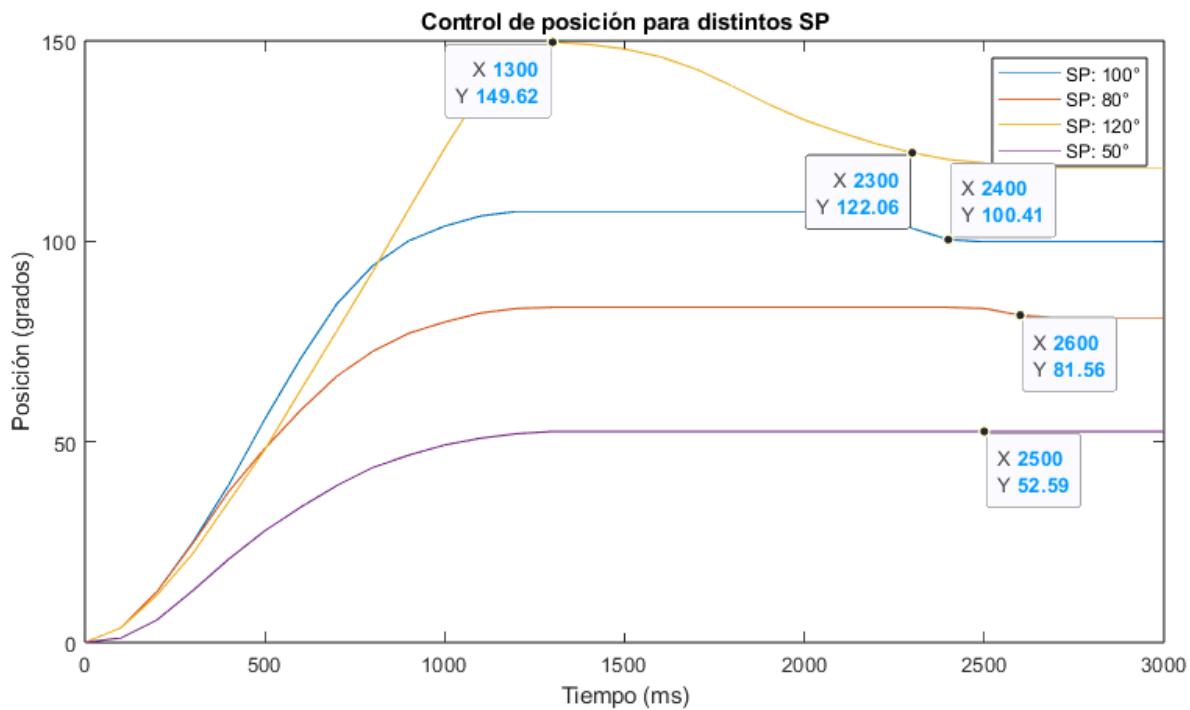
    while(1)
    {
        ek = (tetad - posicion); // error en la posición
        vk = vk_1 + ek;
        uk = K1*vk - K2_1*posicion - K2_2*velangf2;
        env_volt(uk);
        vk_1 = vk;

        Serial.print(t);
        Serial.print(" ");
        Serial.print(uk);
        Serial.print(" ");
        Serial.print(velangf2);
        Serial.print(" ");
        Serial.println(posicion);
        t += T;
        vTaskDelay(T); // Período de muestreo de 100 ms
    }
}
```

Figura 12. Función de servosistema en ESP32

En la Figura 13 se muestra la respuesta de posición para distintos *set points*.

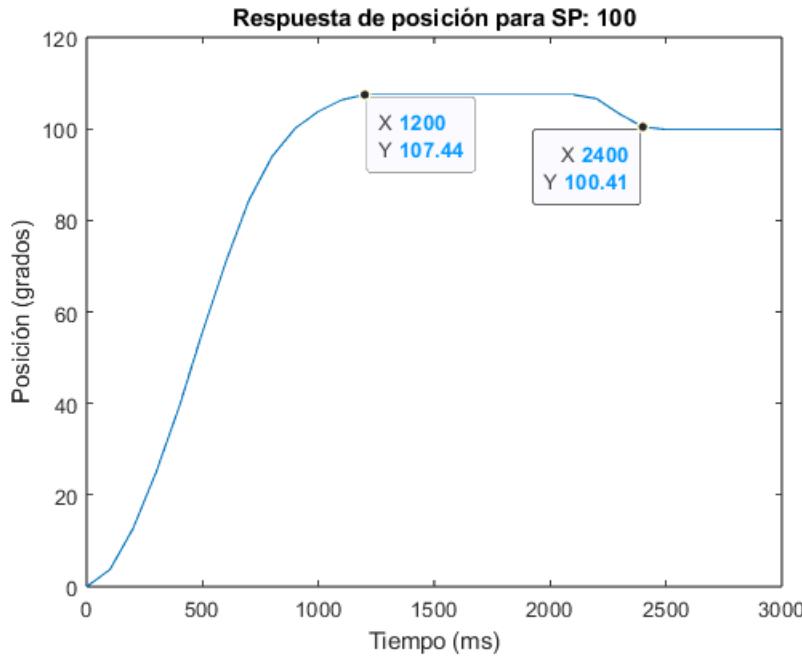
Para los *set points* de 50, 80 y 100 grados se observa un sobreimpulso reducido. Para el *set point* de 120, este es notable. Sin embargo, se considera que la solución cumple lo planteado, al tener un desempeño aceptable alrededor del *set point* de 100 grados.



*Figura 13. Control de posición para distintos Set Points*

En las Figuras 14, 15 y 16 se analiza la respuesta del sistema para el *set point* de 100 grados.

Se observa que la posición se mantiene en 107.44 entre 1.2 a 2 segundos, para posteriormente estabilizarse en el punto de operación deseado de 100 grados.



*Figura 14. Respuesta de posición para set point de 100 grados*

Contrastando lo anterior con la señal de control del sistema, se observa que, en este rango de tiempo, la señal de voltaje se encuentra aproximadamente entre 1 y -1 V, cruzando por 0 V. Se ha observado que el motor presenta una zona muerta para valores reducidos de voltaje, los cuales no superan la inercia del motor para ponerlo en movimiento.

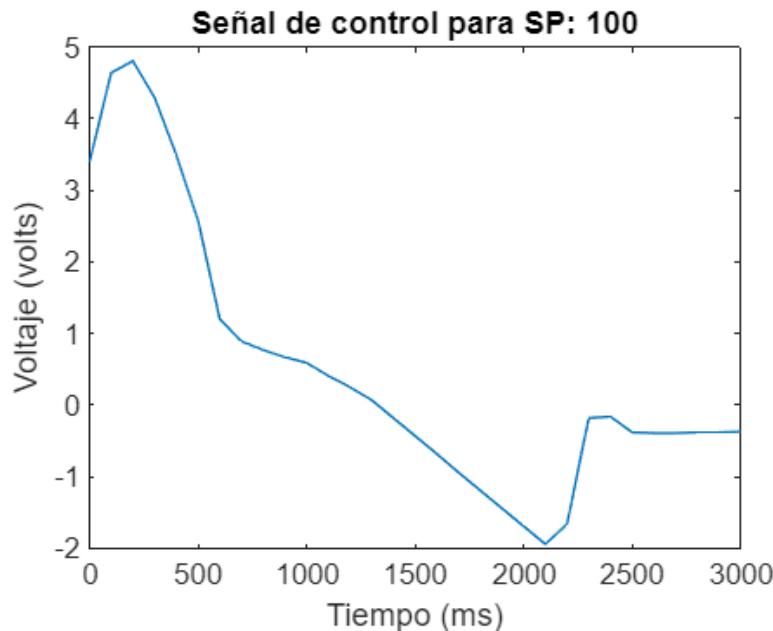


Figura 15. Señal de control para set point de 100 grados

Observando la gráfica de velocidad, en el mismo rango de tiempo la velocidad es muy cercana a 0, el motor no se mueve pese a haber una acción de control en ese rango.

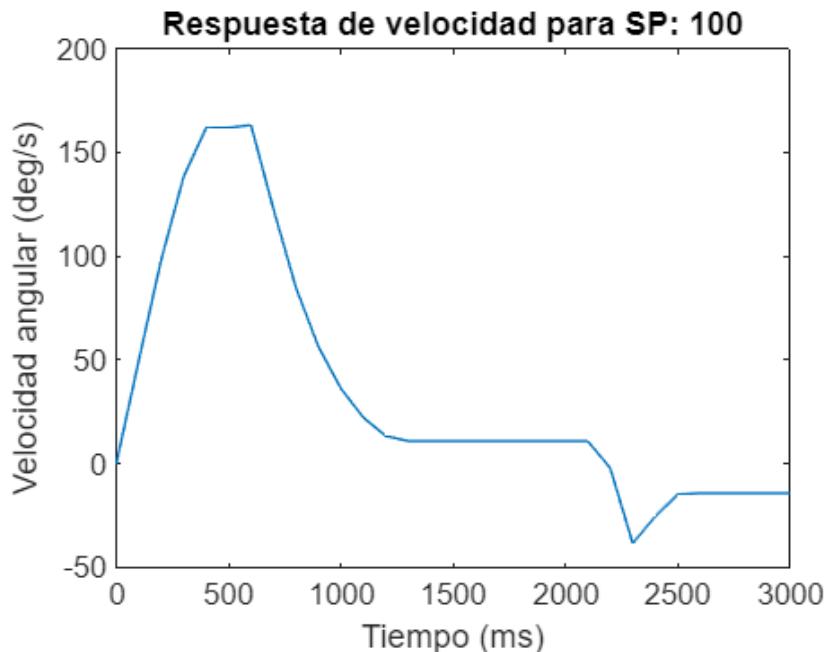


Figura 16. Señal de velocidad para set point de 100 grados

### 3. Conclusiones

Se diseñó un controlador de posición mediante servosistema digital, el cual permitió obtener un desempeño adecuado en términos de tiempo de establecimiento y máximo sobreimpulso.

En la simulación, se observó una breve saturación inicial, la cual se considera que no afecta al funcionamiento del sistema.

La implementación en XSpace confirmó el desempeño observado mediante la simulación, mostrando respuestas aceptables para *set points* de 50, 80 y 100 grados. Sin embargo, para referencias mayores, como 120, se evidenció un sobreimpulso mayor. Además, se identificó la presencia de una zona muerta en el motor, lo cual ocasionó un tiempo de establecimiento mayor en algunos casos.

Finalmente, se concluye que el controlador diseñado cumple con los objetivos planteados de manera satisfactoria. Para mejorar los resultados obtenidos, se debe tener en cuenta reducir la saturación de la señal de control y la zona muerta del actuador.