

# Laboratorio de compensación de sistemas

Autores: Martín Jamilis, Bernabé Ibañez, Facundo Mosquera y Fernando Amor.

## Introducción

El objetivo de esta práctica de laboratorio es llevar a la práctica conceptos de realimentación y diseño de compensadores estudiados en las clases teóricas y prácticas. Para esto se trabajará con plantas y datos experimentales y se compararán los resultados esperados con los obtenidos. Los ensayos a realizar se detallan en las distintas secciones de este documento.

Es imprescindible **leer este documento completo** antes de asistir al laboratorio, ya que cuenta con algunos conceptos nuevos y requiere el diseño previo de controladores. Los diseños de controladores requeridos puede realizarse de forma analítica o utilizando software de cálculo numérico (Matlab, Octave, SciLab o numPy). Se recomienda fuertemente asistir a la práctica de laboratorio con el material y los diseños impresos o en forma digital. También es recomendable contar con una computadora portátil por grupo en la que se puedan realizar cálculos matemáticos, o evaluar la respuesta al escalón de plantas simuladas.

Una vez realizadas las experiencias, se debe entregar un informe del laboratorio por grupo, donde se detalle el problema planteado, pasos seguidos para su resolución, análisis de los resultados obtenidos y conclusiones o valoración final. No se deben exceder las dos páginas por experimento. Adicionalmente, se recomienda que todos los gráficos y diagramas incluidos tengan una escala legible y descripción al pie, además de estar referidos en el cuerpo del texto.

# 1. Simulador de procesos: Ziegler y Nichols - Ensayo a lazo abierto

En esta experiencia realizaremos la sintonía de un controlador PID por medio del método de Ziegler-Nichols basado en la curva de reacción del sistema. La experiencia consiste en preparar la planta simulada, realizar un ensayo de respuesta al escalón a lazo abierto, ajustar las ganancias correspondientes y evaluar la respuesta a lazo cerrado.

## 1.1. Preparación de planta simulada

1. La planta se compone de los bloques Transport Lag, Stage 2 y Stage 3 conectados en cascada. Conexiones: 20-21, 22-25, 26-27, 28-29.
2. Las llaves para selección de velocidad deben estar ambas en Fast (o ambas en Slow).
3. Como se usan dos bloques Stage, la llave de la salida se debe colocar en Even Stages.

## 1.2. Obtención de la respuesta a lazo abierto

Este ensayo se realiza con el sistema a lazo abierto, con plantas cuya respuesta al escalón es del tipo sigmoidea. La primer tarea consiste en obtener dicha respuesta:

1. Configurar el generador de señales para que produzca una onda cuadrada de baja frecuencia ( $< 1$  Hz) y amplitud de  $2 V_{pp}$ <sup>1</sup> y conectarlo a la entrada del proceso (conector 18 y cualquier conector de masa o común).
2. Conectar las puntas del osciloscopio en la entrada y la salida de la planta (18, 28 y conexión a común). Ajustar las sensibilidades verticales y la base de tiempo para observar claramente ambas señales. Se recomienda disparar con el canal que mide la onda cuadrada.

Normalmente, los parámetros de la curva de respuesta que nos permiten calcular los parámetros del controlador se obtienen trazando una curva tangente por el punto de inflexión. Sin embargo, debido al ruido presente y a que las determinaciones se hacen con un osciloscopio, esta técnica es difícil de realizar. Por esto, se propone la utilización del Método de 2 puntos para determinar los parámetros de la curva.

### 1.2.1. Obtención de parámetros de la curva (método de 2 puntos)

Como se muestra en la Figura 1, en este método se miden puntos particulares de la curva de respuesta:

1.  $t_1$ : cuando el cambio en  $y$  ( $\Delta y = y - y_i$ ) es un 28,3% de  $y_f - y_i$  ( $1 - e^{-\frac{1}{3}} = 0,283$ )
2.  $t_2$ : cuando el cambio en  $y$  ( $\Delta y = y - y_i$ ) es un 63,2% de  $y_f - y_i$  ( $1 - e^{-1} = 0,632$ ).

---

<sup>1</sup>Recordar que el generador tiene una impedancia de salida de  $50 \Omega$  y los valores de tensión mostrados en la pantalla contemplan la conexión a un circuito con impedancia de entrada del mismo valor. Como nuestros circuitos tienen impedancias de entrada muy altas, la tensión realmente aplicada será el doble de lo que se muestra en la pantalla.

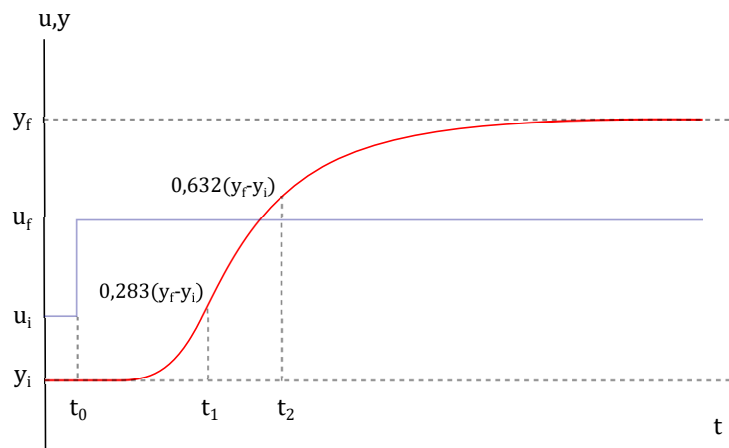


Figura 1: Método de 2 puntos

Utilice los cursores del osciloscopio para determinar de forma precisa el valor de cada uno de estos puntos. Luego:

$$L = 1,5(t_1 - t_0) - \frac{1}{3}(t_2 - t_0)$$

$$T = 1,5(t_2 - t_1)$$

$$K = \frac{y_f - y_i}{u_f - u_i}$$

Notar que el parámetro  $R$  usado en las clases es equivalente a  $\frac{K}{T}$ .

### 1.3. Sintonización del controlador

Habiendo obtenido los parámetros de la curva se pueden calcular los parámetros del controlador PID:

Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{1}{KL}$		
PI	$\frac{0,9T}{KL}$	$3,3L$	
PID	$\frac{1,2T}{KL}$	$2L$	$0,5L$

Tabla 1: Parámetros del controlador para el primer método de Ziegler y Nichols.

El siguiente paso es ajustar estos valores en los bloques del controlador. Con la llave en la posición Fast:

#### 1. Bloque Amplification:

- Conectar el generador de señales en su entrada (8) configurado con una señal sinusoidal de 100Hz y 5Vpp de amplitud.
- Conectar las puntas del osciloscopio en la entrada (8) y la salida (14) del bloque de amplificación.

- c) Observando las amplitudes de la entrada y la salida, ajustar el potenciómetro hasta obtener la ganancia  $K_p$  antes calculada. Para esto puede ser útil usar los cursores o la función Measure del osciloscopio.
- 2. Bloque Integrator:
  - a) Conectar el generador de señales en su entrada (2) configurado con una señal sinusoidal de frecuencia  $\frac{1}{T_i}$  rad/s y 5Vpp de amplitud.
  - b) Conectar las puntas del osciloscopio en la entrada (2) y la salida (9) del bloque integrador.
  - c) Observando las amplitudes de las señales de entrada y la salida, ajustar el potenciómetro hasta que estas sean iguales, es decir, hasta que la ganancia sea unitaria.
- 3. Bloque Derivator: Realizar el mismo procedimiento que con el bloque integrador, pero con una frecuencia  $\frac{1}{T_d}$  rad/s. Recuerde medir a la salida del derivador en este caso (11).

## 1.4. Cierre del lazo realimentado

En este último paso, se conecta el controlador a la planta y se realimenta su salida. Para esto:

1. Realice las conexiones 14-18, 34-35, 7-8, 9-10, 11-12.
2. Configure una onda cuadrada en el generador de señales, como la usada para obtener la respuesta al escalón de la planta.
3. Para ver la respuesta a perturbaciones, conecte el generador de señales en Supply Disturbance (17 y común) y la referencia (3) al común. Alternativamente puede usar el generador de perturbaciones de la placa (Set/Disturbance Signal). Conecte las puntas del osciloscopio en 17, 28 y común.
4. Para ver la respuesta a la referencia, conecte el generador de señales a los puntos 3 y común. Conecte las puntas del osciloscopio en 3, 28 y común.

Finalmente, observe las respuestas obtenidas e intente interpretarlas. Debería observarse una respuesta a la perturbación donde el segundo pico tiene aproximadamente 0.25 la amplitud del primero ("quarter decay"). Puede realizar pequeños cambios en los parámetros del PID para ver su efecto en la respuesta.

## 2. Simulador de procesos: Ziegler y Nichols - Método de curva de la ganancia crítica

En esta experiencia realizaremos la sintonía de un controlador PID por medio del método de Ziegler-Nichols basado en la ganancia de realimentación crítica que hace oscilar al sistema. La experiencia consiste en preparar la planta simulada, realizar el ensayo de búsqueda de ganancia crítica, ajustar las ganancias correspondientes y evaluar la respuesta a lazo cerrado.

### 2.1. Obtención de la respuesta a lazo cerrado y sus parámetros

Este ensayo se realiza con el sistema realimentado únicamente con una ganancia, llevando a la salida de la planta a la oscilación. Para realizar esto:

1. Configurar el generador de señales para que produzca una onda cuadrada de frecuencia menor a 1 Hz y Amplitud de 2Vpp y conectarlo a la entrada de set-point (conector 3 y cualquier conector de masa o común).
2. Realizar las conexiones indicadas en la Sección 1.1 y las siguientes conexiones: 7-8, 14-18, 34-35
3. Conectar las puntas del osciloscopio a la referencia y la salida de la planta (3, 28 y conexión a común).
4. Partiendo de la posición mínima, incremente gradualmente la ganancia proporcional del bloque Amplification. Observe como la respuesta se vuelve cada vez más oscilatoria. Realizar esta acción hasta obtener una oscilación sostenida.
5. Determine mediante los cursores o la función Measure el período de la oscilación.
6. Desconecte el bloque de amplificación del lazo y, mediante el procedimiento explicado en la Sección 1.3, determine el valor de la ganancia crítica que hace oscilar al sistema.

### 2.2. Sintonización del controlador y cierre del lazo

Habiendo obtenido los parámetros de la respuesta se pueden calcular los parámetros del controlador PID:

Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0,5K_c$		
PI	$0,45K_c$	$0,85T_c$	
PID	$0,6K_c$	$0,5T_c$	$0,12T_c$

Tabla 2: Parámetros del controlador para el segundo método de Ziegler y Nichols.

El procedimiento para ajustar los valores del controlador y cerrar el lazo es el mismo que el descrito en las Secciones 1.3 y 1.4. Observe las respuestas obtenidas e interprételas.

### 3. Bola y viga

En esta experiencia realizaremos la sintonía de un controlador para un sistema inestable a lazo abierto, basándonos en su modelo teórico. La experiencia consiste en realizar el diseño, configurar los parámetros del controlador y evaluar la respuesta obtenida.

La figura 2 muestra un diagrama esquemático de un sistema Bola-Viga (Ball and Beam). Este consta de una bola que rueda sobre una viga rígida cuya inclinación puede variarse con un servomotor. El objetivo es ubicar a la bola en una determinada posición de la viga. Como puede imaginarse, este sistema es inestable a lazo abierto, por lo que es necesario diseñar un controlador adecuado para poder cumplir con el objetivo de control.

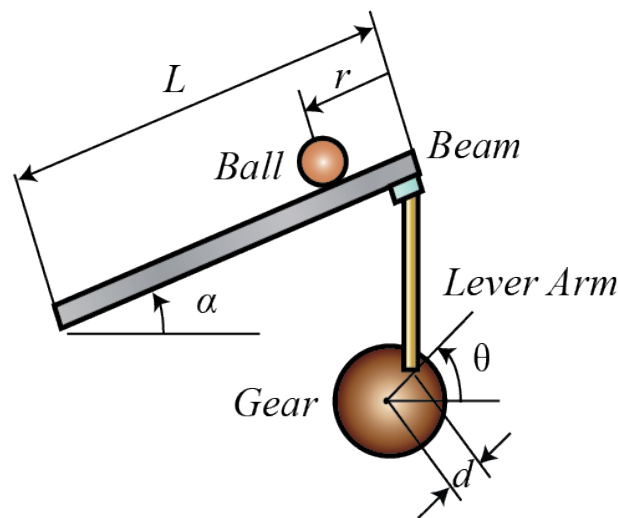


Figura 2: Esquema de una planta de Bola y Viga

#### 3.1. Consigna previa al laboratorio

Diseñe un compensador compuesto por un par cero-polo que permita estabilizar al sistema en una posición deseada.

Para esto puede valerse del modelo linealizado del sistema<sup>2</sup>:

$$G(s) = \frac{r}{\theta} = -\frac{mgd}{L(\frac{J}{R^2} + m)} \cdot \frac{\pi}{180} \cdot 100 \cdot \frac{1}{s^2} \quad (1)$$

Todos los parámetros del modelo se definen en la Tabla 3.

Especificaciones de diseño:

1. Error de estado estacionario al escalón nulo.
2. Tiempo de establecimiento menor a 10 segundos.
3. Acciones de control menores a los  $\pm 90^\circ$

Una vez diseñado el compensador, determinar los parámetros de un controlador PD equivalente, siguiendo la siguiente relación:

<sup>2</sup><https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=BallBeam&section=SystemModeling>

Símbolo	Descripción	Valor y unidad
$m$	masa de la bola	0,182 kg
$R$	radio de la bola	0,057 m
$d$	longitud del brazo del servo	0,025 m
$g$	acel. de la gravedad	9,8 m/s <sup>2</sup>
$L$	largo de la viga	0,3 m
$J$	momento de inercia de la bola	$\frac{2}{5}mR^2$ [kg m <sup>2</sup> ]
$r$	posición de la bola	cm
$\alpha$	ángulo de la viga	°
$\theta$	ángulo del servo	°

Tabla 3: Parámetros del sistema bola-viga

$$C(s) = k \frac{s+a}{s+b} = k_p \left( 1 + \frac{sT_d}{1 + sT_d/N} \right) = PD \quad (2)$$

Tome nota de los tiempos de establecimiento, amortiguamiento y otros parámetros importantes de la respuesta al escalón del sistema a lazo cerrado.

### 3.2. Consigna para el laboratorio

Con la ayuda del docente a cargo configure los parámetros del PD calculado en la computadora. Realice algunos cambios de set-point y verifique:

1. Estabilidad del sistema.
2. Error de seguimiento nulo.
3. Tiempo de respuesta y amortiguamiento.

¿Existen diferencias entre la respuesta esperada y la real? ¿A qué se pueden deber esas diferencias? ¿Cómo podría mejorar el desempeño del sistema?

## 4. Motor de corriente continua

En esta experiencia realizaremos el control de velocidad de un motor de corriente continua, cargado con un freno, en base a determinaciones experimentales de su respuesta en frecuencia. La experiencia consiste en diseñar el controlador en base a los datos, preparar la planta, ajustar las ganancias de controlador y evaluar la respuesta a lazo cerrado.

### 4.1. Consigna previa al laboratorio

Diseñe un compensador PI que permita establecer la velocidad del motor en un valor deseado, cumpliendo con las siguientes especificaciones de diseño:

1. Error de estado estacionario al escalón nulo.
2.  $MF \geq 60^\circ$  a  $\omega_{0dB} \cong 20 \text{ rad/s}$
3.  $1 < k_p < 100$  y  $5 \text{ ms} < T_i < 100 \text{ ms}$

Para el diseño se cuentan con algunas medidas de la respuesta en frecuencia de la planta compuesta por el motor cargado por un roce, la etapa de potencia que lo excita, y un dínamo que se usa para medir su velocidad. Los valores medidos se encuentran en el archivo `motor.mat`. Para realizar el diseño, puede trabajar directamente sobre el diagrama de bode de los datos experimentales, realizando sobre este las modificaciones generadas por el agregado de ganancia o singularidades a las frecuencias que se realizaron las medidas. Alternativamente, puede tratar de aproximar el modelo de la planta *artesanalmente*, buscando distintas combinaciones de polos y ceros que aproximen a la respuesta en frecuencia experimental (diagrama de Bode). Cualquier combinación que elija debe dar una planta a lazo abierto estable. Configuraciones sugeridas: 2 polos o 1 polo y un cero de fase no mínima.

### 4.2. Consigna para el laboratorio

Con ayuda del docente configure los parámetros del control PI siguiendo un procedimiento similar al explicado en la Sección 1.3. Luego:

1. Realice las conexiones 4-23, 6-10, 11-12, 13-14, 17-18, 29-30, 26-27, 34 y 35 a motor y cable de transductores.
2. Configure una onda cuadrada en el generador de señales con un periodo mayor a 1 segundo, amplitud mayor a 1V y offset tal que la tensión siempre sea positiva.
3. Para ver la respuesta a cambios de set-point, conecte el generador de señales entre la referencia (5) y común. Conecte las puntas del osciloscopio en 5, 4 y común.

Finalmente, observe las respuestas obtenidas e intente interpretarlas. Compare con los resultados esperados de diseño.

Además verifique el margen de fase obtenido, para esto debe buscar la frecuencia a la que el sistema a lazo cerrado atenúa al set-point a la mitad ( $\frac{G}{1+G} = 0,5$ ):

1. Configure una referencia sinusoidal en el generador de señales con amplitud de 1Vpp y offset de 1V.



2. Varíe la frecuencia de la señal de excitación hasta que la ganancia del sistema a lazo cerrado sea de 0.5.
3. Una vez hallada la frecuencia, mida la fase del sistema. Para esto utilice los cursores del osciloscopio.
4. A esa frecuencia  $\angle \frac{G}{1+G} = 0,5\angle G$ . Verifique si el MF obtenido es similar al buscado.

¿Existen diferencias entre la respuesta esperada y la real? ¿A qué se pueden deber esas diferencias?