

# **PRÁCTICAS DE LABORATORIO**

## **INTRODUCCIÓN A LA TEORÍA DE CONTROL**

**Departamento de Sistemas y Control**

**Instituto de Ingeniería Eléctrica**

**Facultad de Ingeniería**

Edición 2016

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>3</b>
<b>OBJETIVOS Y DESCRIPCIÓN GENERAL DEL LABORATORIO</b>	<b>3</b>
<b>EVALUACIÓN DEL LABORATORIO</b>	<b>4</b>
<b>MATERIAL A TRAER POR EL ESTUDIANTE</b>	<b>5</b>
<b>SÍMBOLOS UTILIZADOS EN ESTE MANUAL</b>	<b>5</b>
<b>SECCIÓN I: EQUIPOS DEL LABORATORIO DE CONTROL</b>	<b>6</b>
<b>PLANTA: PAR MOTOR-GENERADOR Y DRIVER</b>	<b>7</b>
A. DESCRIPCIÓN	7
B. DRIVER	7
C. CONEXIONES	9
<b>CAJAS ANALÓGICAS</b>	<b>10</b>
A. DESCRIPCIÓN	10
B. BLOQUES PROPORCIONALES	10
C. BLOQUES INTEGRADORES	10
D. CONEXIONES	11
<b>SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE SEÑALES</b>	<b>12</b>
A. LA TARJETA ADQUISIDORA Y SU CAJA DE PROTECCIÓN	12
B. EL PROGRAMA DE ADQUISICIÓN	13
<b>SECCIÓN II: PRACTICAS</b>	<b>16</b>
<b>PRACTICA 0: USO DE MATLAB Y DE LAS CAJAS ANALÓGICAS</b>	<b>17</b>
A. HERRAMIENTAS DE CONTROL DE MATLAB	17
B. UTILIZACIÓN DE LAS CAJAS ANALÓGICAS	19
C. PREGUNTAS	19
D. PREINFORME	19
<b>PRACTICA 1: MODELADO E IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS</b>	<b>20</b>
A. MODELO TEÓRICO	20
B. ENSAYOS	21
C. IDENTIFICACIÓN	23
D. VERIFICACIÓN DEL MODELO IDENTIFICADO	23
E. PREINFORME	23
F. PREGUNTAS	24
G. SOBRE EL INFORME FINAL	24
<b>PRACTICA 2: DISEÑO Y SIMULACIÓN DE CONTROLADORES ASISTIDO POR COMPUTADORA</b>	<b>25</b>
A. DISEÑO DE CONTROLADORES ASISTIDO POR COMPUTADORA	25
B. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO	25
C. SOBRE EL INFORME FINAL	26
<b>PRACTICA 3: IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE CONTROLADORES</b>	<b>27</b>
A. IMPLEMENTACIÓN	27
B. ENSAYOS	27
C. PREINFORME	27
D. PREGUNTAS	28
E. SOBRE EL INFORME FINAL	28
<b>APÉNDICE</b>	<b>29</b>
<b>SOBRE LA ESCRITURA DE INFORMES</b>	<b>29</b>
<b>MODELO DE INFORME DE LABORATORIO</b>	<b>30</b>

# Introducción

## ***Objetivos y descripción general del Laboratorio***

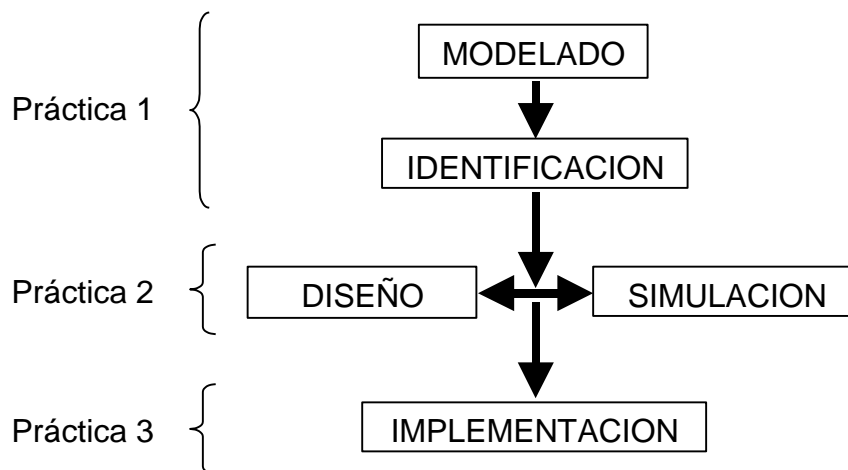
El Laboratorio de Control tiene como objetivo familiarizar al estudiante con las técnicas experimentales básicas del control.

Si bien el Laboratorio se compone de varias prácticas, todas ellas integran un único proceso de ingeniería mediante el cual se busca controlar una planta física. El objetivo final de este proceso es implementar un controlador para dicha planta, de tal forma que ésta cumpla ciertos requerimientos específicos de desempeño. En este sentido, las diferentes prácticas buscarán completar, sucesivamente, las etapas básicas del proceso de ingeniería de control, a saber:

Práctica 1: Modelado e identificación de parámetros

Práctica 2: Simulación y diseño de controladores asistido por computadora

Práctica 3: Implementación y evaluación de controladores



Este concepto debe estar presente en el desarrollo del Laboratorio, en especial durante la realización de los informes. Al comienzo de cada práctica se entregará un preinforme de la misma que será revisado durante la práctica. Concluidas las prácticas de Laboratorio y basándose en los preinformes, se deberá realizar un informe completo del Laboratorio considerando a éste como un único proceso y no como la unión de prácticas independientes.

Previo a las prácticas antes mencionadas, se hará la “Práctica 0: Uso de herramientas de MATLAB y cajas analógicas”, cuyo objetivo es familiarizar al estudiante con las herramientas con las cuales diseñará y construirá los controladores. En esta práctica se avanzará en la solución de algunos problemas de implementación, que de otra forma tendrían que ser resueltos durante las prácticas siguientes, desviando la atención del objetivo principal.



Vista de la mesa de trabajo del Laboratorio de Control

## ***Evaluación del Laboratorio***

Si bien el trabajo en el laboratorio es grupal, la evaluación será también individual.

<b>Qué se evalúa</b>	<b>Cómo se evalúa</b>
Conocimientos previos necesarios para la práctica	Cuestionario escrito individual, al comienzo de la práctica
Preinformes	Corrección en el transcurso del laboratorio
Desempeño durante la práctica	Cumplimiento de lo encomendado en cada práctica Participación uniforme de todos los integrantes del grupo Capacidad de trabajo grupal, independiente del docente Buen uso de los equipos de laboratorio
Informe final	Calidad de las actividades realizadas (ensayos, tratamiento y análisis de datos, diseño e implementación de controladores, etc.) Calidad del reporte de las actividades realizadas (claridad de redacción, uso correcto de imágenes, etc.) Correcto manejo de la información y exposición de conclusiones Calidad de la presentación

## ***Material a traer por el estudiante***

El laboratorio requiere de los siguientes materiales para su realización

- Memoria USB
- Cables finos. Se sugiere comprar 1m de cable de red usar los conductores internos
- Cinta aisladora
- Alicates, pinzas
- Destornilladores pequeños
- Multímetro

## ***Símbolos utilizados en este manual***



### **ATENCIÓN**

El símbolo de atención representa advertencias sobre voltajes y conexiones que en caso de no realizarse adecuadamente, producen daños a los equipos del Laboratorio. Es MUY IMPORTANTE que lea detenidamente estas advertencias y actúe en consecuencia.



### **IMPORTANTE**

El símbolo de importante marca indicaciones y consejos a tener en cuenta para realizar las prácticas correctamente. El no seguimiento de estas indicaciones puede provocar la REPETICION parcial o total de las mismas.



### **INFORMACION**

El símbolo de información indica donde obtener mayor información sobre un determinado tema o equipo.

# **Sección I: Equipos del Laboratorio de Control**

## Planta: Par Motor-Generador y Driver

### A. Descripción

Cada caja contiene un motor y un generador de corriente continua acoplados por sus ejes y un driver para manejar el motor (ver Fig. I.1). La salida del generador tiene un filtro pasabajos RC para atenuar las perturbaciones sobre la tensión de salida. Los bornes para conectar la tensión de entrada al driver, y para medir la tensión de salida del generador (luego del filtro), se encuentran accesibles en el frente de la caja. Es posible conectar una carga ( $R_c$ ) a la salida del generador mediante una llave en el panel frontal.

La Fig. I.2 muestra el diagrama interno de conexiones de la caja.



Figura I.1. Caja del par motor-generador.

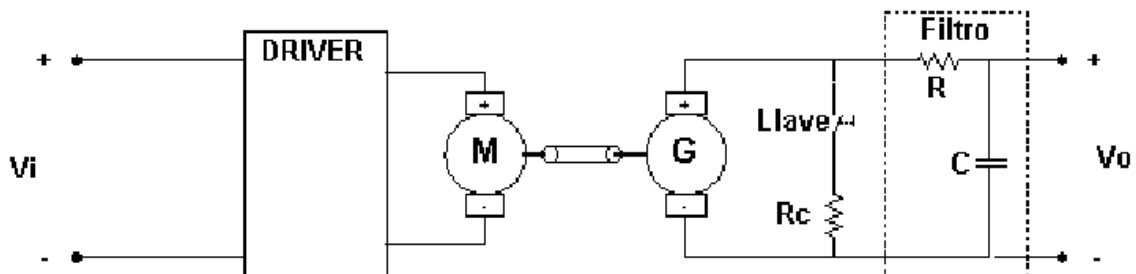


Figura I.2. Diagrama esquemático del par motor-generador y su driver.

Valores aproximados de los componentes de los componentes:

- $R_c = 8,2 \Omega$
- $R = 56 \Omega$
- $C = 47 \mu F$

### B. Driver

El driver es un circuito eléctrico capaz de accionar en forma eficiente un motor de corriente continua. La idea básica es que la componente de continua de la tensión de salida del driver es directamente proporcional a la tensión de entrada. Esto se cumple dentro de cierto ancho de banda y en ausencia de tensión de offset. Es decir, que a los efectos del modelado en baja frecuencia del driver, este se puede representar mediante una ganancia proporcional entre entrada y salida.

### Principio de funcionamiento

El principio de operación del circuito driver se basa en el puente en “H”, que se muestra en la Fig. I.3.

Básicamente se trata de 4 transistores o “llaves” conectados entre la tensión de la fuente (15 Vcc) y tierra formando una “H”. La salida del driver son los puntos intermedios de la misma. Las llaves “cierran” en parejas de la siguiente forma:

- S1/S4 cerradas, S2/S3 abiertas:  
Voltaje de salida = + 15 Vcc
- S1/S4 abiertas, S2/S3 cerradas:  
Voltaje de salida = - 15 Vcc

La conmutación de las llaves se realiza a una frecuencia de 17,4 kHz formando una onda cuadrada de salida como se muestra en la Fig. I.4. El ciclo de trabajo de esta onda cuadrada, dado por la relación entre los tiempos de cierre de las parejas de llaves, es regulable entre 0% y 100%. Un ciclo de trabajo de 0% equivale a un voltaje de salida constante de -15 Vcc, mientras que el 100 % equivale a +15 Vcc. Un valor intermedio del ciclo de trabajo resulta en una onda cuadrada cuya componente de continua se encuentra entre -15 Vcc y +15 Vcc. **El circuito esta hecho de tal forma que esta componente de continua es proporcional al voltaje de entrada.**

Debido a que un motor de continua se comporta como filtro pasabajos, al ser alimentado con la señal de salida del driver sólo “verá” la componente de continua (las bajas frecuencias). Por ello, se caracteriza al driver mediante una ganancia proporcional entre entrada y salida. El valor aproximado de esta ganancia es **2**.

El motivo de manejar el motor con esta onda cuadrada y no directamente con un simple amplificador es la potencia disipada por los componentes que le entregan la corriente a la carga. Si estudiamos uno de los transistores, se puede apreciar que cuando está conduciendo la caída de potencial entre terminales “drain” y “source” es muy pequeña con lo cual conseguimos que la potencia disipada sea baja.

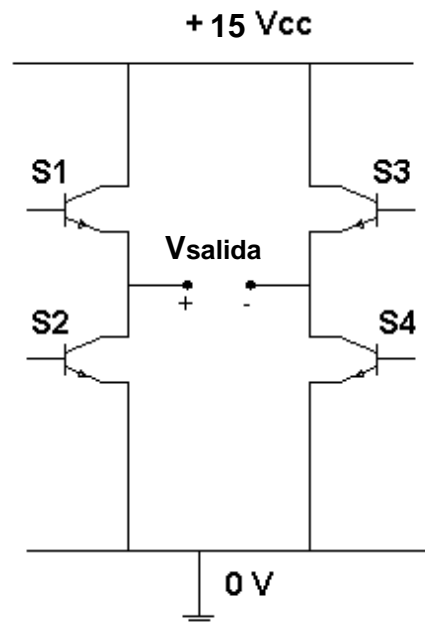


Figura I.3. Puente en “H” del circuito driver.

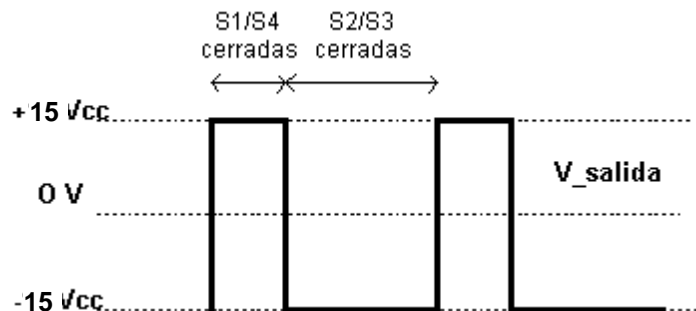


Figura I.4. Forma de onda de salida del driver.



## C. Conexiones

La alimentación del driver es simétrica:

- + 15 V – cable rojo
- 0 V – cable negro
- - 15 V – cable azul

Estos cables se encuentran en la parte posterior.



**ATENCION** La conexión incorrecta provocará daños en la electrónica.

La Fig. I.5 muestra el frente, que contiene:

- Llave de alimentación
- Llave de conexión de la carga al par M-G
- Bornes de señal de entrada (al driver)
- Bornes de señal de salida (del generador)

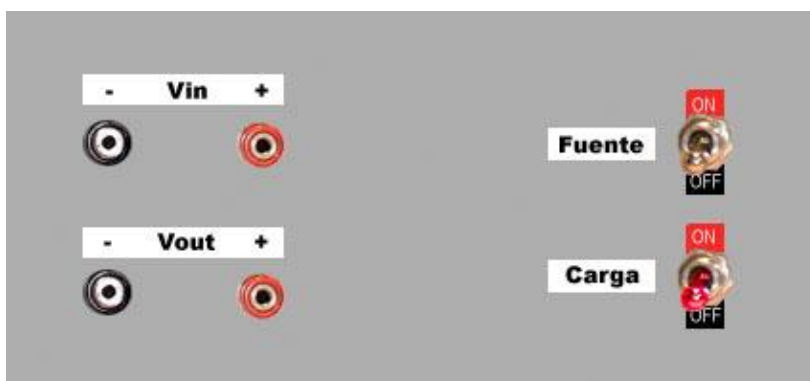


Figura I.5. Frente del par motor-generator y driver.



**ATENCION** La tensión máxima de alimentación del sistema es 3 V.



**IMPORTANTE**

La salida del generador es una tensión flotante, por lo cual se debe conectar el borne negativo a tierra para su visualización en el osciloscopio.

## Cajas analógicas

### A. Descripción

Las cajas analógicas contienen bloques funcionales básicos (basados en amplificadores operacionales) a partir de los cuales es posible construir bloques más complejos. Estos son:

- 3 bloques proporcionales (amplificadores)
- 3 bloques integradores



Figura I.6. Caja analógica.

### B. Bloques proporcionales

Estos amplificadores poseen 4 entradas (2 no inversoras y 2 inversoras), un sumador, una llave selectora de rango y un potenciómetro. El esquema de conexiones se presenta dibujado sobre la carcasa de la caja y se muestra en la Fig. I.7.

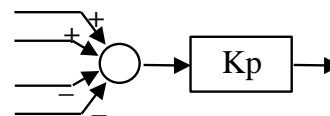


Figura I.7. Bloque proporcional.

La llave selectora permite escoger entre 3 rangos de amplificación:

- $K = 0,1 \dots 1,0$
- $K = 1,0 \dots 10$
- $K = 10 \dots 100$

Dentro de cada rango, se varía la ganancia con el potenciómetro.

### C. Bloques integradores

Cada integrador posee una entrada, una llave selectora de rango y un potenciómetro. El esquema de conexiones se presenta dibujado sobre la carcasa de la caja y se muestra en la Fig. I.8.

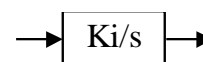


Figura I.8. Bloque integrador.

La llave selectora permite escoger entre 3 rangos para la constante de integración:

- $K_i = 0,005 \dots 0,05 \text{ rad/seg}$
- $K_i = 0,05 \dots 0,5 \text{ rad/seg}$
- $K_i = 0,5 \dots 5,0 \text{ rad/seg}$

Dentro de cada rango, se varía la ganancia con el potenciómetro.

## D. Conexiones

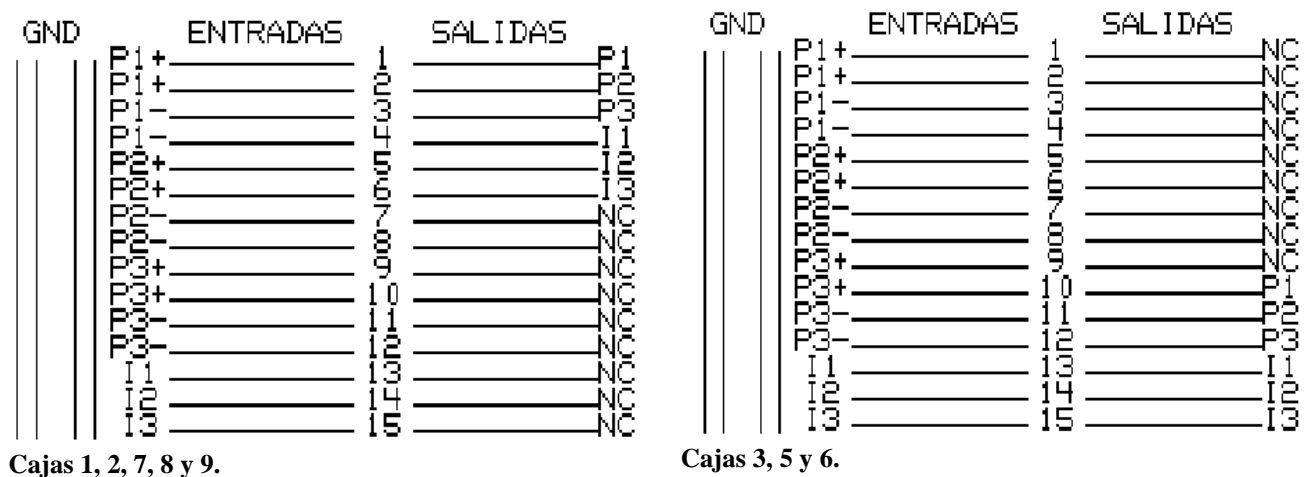
La alimentación de las cajas es simétrica:

- + 15 V – cable rojo
- 0 V – cable negro
- - 15 V – cable azul



**ATENCIÓN** La conexión incorrecta provocará daños en la electrónica.

Las conexiones de entrada/salida de los bloques básicos se realizarán sobre los zócalos tipo “protoboard” que se encuentran sobre las cajas. Las conexiones de entrada se encuentran agrupadas a la izquierda y las de salida a la derecha según se muestra en la Fig. I.9.



INTEGRAL 1	INTEGRAL 2	INTEGRAL 3	PROPORCIONAL 1	PROPORCIONAL 2	PROPORCIONAL 3	TIERRA
● ●	● ●	● ●	● ● ● ● ●	● ● ● ● ●	● ● ● ● ●	● ● ● ● ●
In Out	In Out	In Out	- In - In + In + In Out	- In - In + In + In Out	- In - In + In + In Out	Gnd Gnd Gnd Gnd Gnd

Cajas 4, 10 y 11.

**Figura I.9.** Conexiones de entrada / salida de cajas analógicas.

P1, P2 y P3 representan las conexiones de los 3 bloques proporcionales, mientras que I1, I2 e I3 hacen referencia a los integradores. NC significa “No Conectado”.

## ***Sistema de adquisición de señales***

### **A. Osciloscopio digital**

Se trata de un osciloscopio digital Hantek 1008, de las siguientes características:

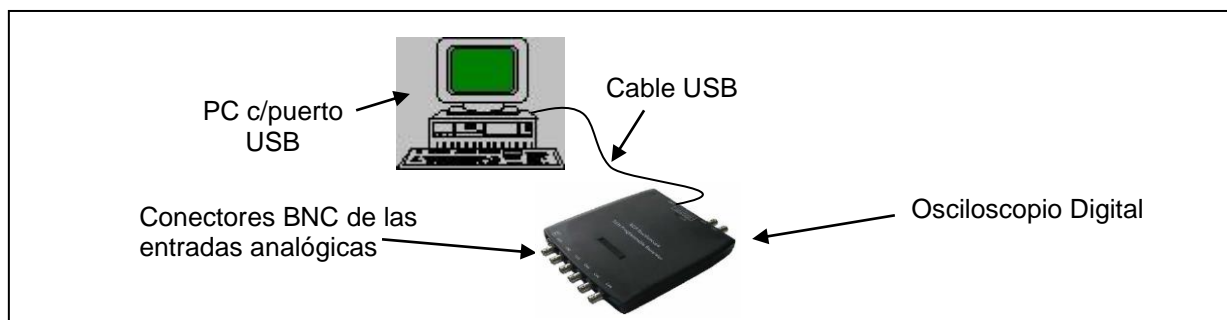
- Adquisición: tiempo real, hasta 2,4 MS/s
- Entrada:
  - Ancho de banda: 100 kHz
  - Impedancia de entrada: 1 M $\Omega$
  - Atenuación 1X, 10X, 100X, 1000X, 10000X, 20:1
  - Protección 400Vpk (DC+AC peak)
  - 8 canales analógicos @12bit de resolución
  - Máximo ancho de medida 4kS
- Disparo desde cualquier canal en modos Auto, Normal y Señal. Flanco con nivel y pendiente definibles.
- Medidas: Vpp, Vmax, Vmin, Vmean, Vrms, Frecuencia, Período, Rise y Fall time, Duty cycle, etc.
- Generador de señal cuadrada en nivel LVTTTL (3.3V), frecuencias entre 0 y 250 KHz.
- Conexión USB para PC

La placa de adquisición puede ser utilizada con cables BNC normales o con puntas de osciloscopio, teniendo en consideración que se debe configurar el factor de atenuación adecuado.



#### **INFORMACION**

Para mayor información, consultar el Manual de Usuario del osciloscopio digital Hantek 1008.



**Figura I.10.** Conexión a PC del osciloscopio digital.

## B. El programa de adquisición

Este programa permite adquirir señales de un conjunto de canales analógicos de entrada visualizarla en pantalla, realizar una serie de mediciones básicas, y guardar esa información en disco, para su posterior análisis.

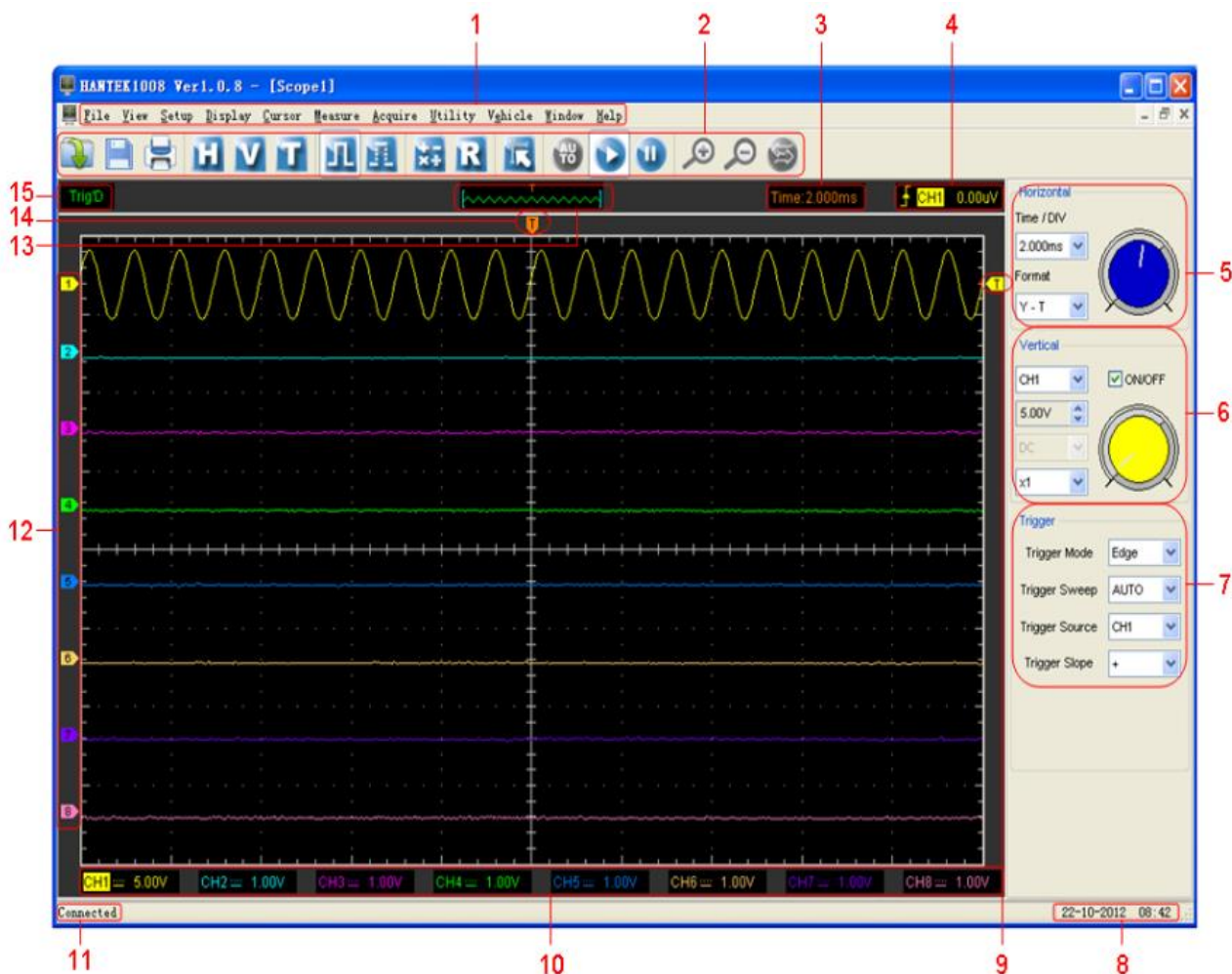


Figura I.11. Pantalla del programa de adquisición.

1. Menú principal
2. Herramientas. Permite guardar señales, configurar ejes y pausar adquisiciones
3. Escala de tiempo. En caso de estar usando el osciloscopio en modo Y-T muestra el valor de la escala en s/div.
4. Configuración del trigger. Muestra el flanco, el nivel y el canal de disparo.
5. Configuración de horizontal.
6. Configuración de vertical.
7. Configuración de trigger.

8. Fecha y hora del sistema.
9. Marcador de nivel de trigger.
10. Resumen de acoplamientos y escalas verticales.
11. Status de conexión.
12. Regulación de offset vertical.
13. Offset de offset horizontal.
14. Regulación de offset horizontal.
15. Status del trigger.

### ***Ejecución del programa***

1. Dentro de Windows, en el escritorio, seleccionar el icono HANTEK1008

### ***Configuración de los parámetros de la adquisición***

La configuración es similar a la de un osciloscopio.

1. Seleccionar el canal con el que se dispara la adquisición, el flanco creciente o decreciente, y el tipo de disparo (continuo, sincronizado).
2. Seleccionar los canales que se mostrarán (y adquirirán), y la resolución vertical (Volts/división).
3. Seleccionar el modo (vs. tiempo o X-Y) y la resolución horizontal (tiempo/división).

Los detalles sobre la configuración se muestran en el manual del equipo, disponible en el EVA del curso.

El sistema comienza a capturar muestras y mostrarlas en forma automática, de la misma forma que lo haría un osciloscopio.

### ***Grabación a disco***

1. Detener la adquisición.
2. Presionar el botón Grabar (2º a la izquierda de la barra de herramientas).
3. Seleccionar el canal a grabar
4. Ingresar la carpeta y el nombre del archivo.

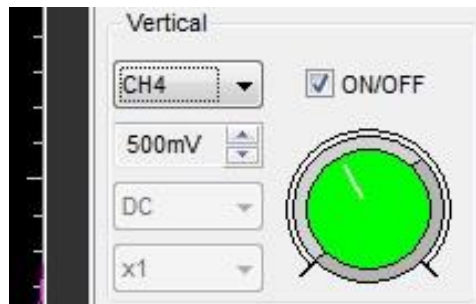


**ATENCIÓN** Cada canal queda guardado en un archivo independiente. **La información de la resolución vertical (V/Div) es fundamental para la correcta interpretación de los datos y no es registrada en el archivo!!!**

Por lo tanto debe incluirse en el nombre archivo. Para que los datos puedan pasarse a escala Volts, el nombre del archivo debe terminar en “@XXXwVxD.txt”, donde XXX es el

valor de la resolución vertical de ese canal, y **w** puede ser “u” para microVolts, “m” para miliVolts”, o “\_” para Volts.

Por ejemplo, para la figura de la derecha, el nombre del archivo sería Ensayo1Canal4@500mVxD.txt



**Figura I.12.** Acercamiento de la pantalla del programa de adquisición.



**ATENCIÓN** Todos los archivos deberán guardarse bajo en el directorio **c:\control\grupos\Xi**, donde Xi es el nombre del grupo (por ejemplo, el grupo 3 de la tarde es T3.)

## **Sección II: PRÁCTICAS**



# **PRÁCTICA 0:**

## **Uso de MATLAB y de las cajas analógicas**

**Objetivo:** Familiarización con herramientas de simulación digital e implementación analógica de sistemas.

### **A. Herramientas de control de MATLAB**

MATLAB posee un paquete de funciones (Toolbox) de Control. Algunas serán usadas durante el Laboratorio para simular y diseñar controladores. Para esto es fundamental conocer sus prestaciones y limitaciones.

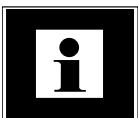
El instructivo **“Usando MATLAB para resolver problemas de Control”** contiene explicaciones y ejemplos de las funciones de control de MATLAB más usadas.



**IMPORTANTE** Los ejercicios resueltos en MATLAB serán ejecutados durante esta práctica junto al docente. Par evitar problemas de compatibilidades, versiones, bibliotecas disponibles, etc., se recomienda mostrar los ejercicios resueltos en la máquina donde fueron desarrollados y donde se usarán.

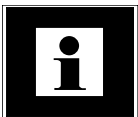
La solución será expuesta durante la práctica, donde deberán analizarse las ventajas y desventajas de diferentes métodos, las precauciones a tomar, los inconvenientes encontrados y cómo fueron resueltos. (Unos 5 minutos por ejercicio)

Cuando se resuelva un ejercicio con MATLAB se deberá evitar realizar manualmente operaciones que se encuentran disponibles como funciones de MATLAB. Las curvas en una misma figura deben ser claramente identificadas.



#### **INFORMACION**

Los programas generados en los ejercicios podrán servir en un futuro para las etapas de identificación y análisis de datos. Se recomienda la lectura de las prácticas siguientes para orientar la programación.



#### **INFORMACION**

MATLAB cuenta con una serie de funciones que pueden ser de gran utilidad para estos ejercicios. Algunas de ellas son:

- Butter – Diseño de filtros de Butterworth
- Filter – Filtrado de señales
- Polyfit – Ajuste de polinomios
- Fmins – Minimización de funciones de varias variables

**Ejercicio 1: Linealización de una curva**

- ❖ Considere el siguiente conjunto de datos experimentales, obtenidos en un ensayo de respuesta estática de una determinada planta. Para obtener estos datos se aplicaron los valores de entrada (U) mostrados en la tabla y se registraron los valores de salida (Y) luego de alcanzado el régimen. Los valores aparecen en el orden en que fueron aplicados y en unidades arbitrarias.

<b>U</b>	0	1,0	1,2	1,4	1,6	2,0	2,5	3,0	2,5	2,0	1,6	1,4	1,2	1,0	0,9	0,8	0,7
<b>Y</b>	0	0,8	1,1	1,4	1,9	2,6	3,5	4,2	3,2	2,4	1,8	1,5	1,1	0,9	0,7	0,5	0,3

- ❖ Elabore un programa que permita obtener el polinomio de primer orden que mejor ajuste a los datos de acuerdo con dos criterios: forzando el pasaje por 0, y sin forzarlo. Ajustar la curva considerando las siguiente zonas de la entrada U:
  - todos los valores
  - valores crecientes
  - valores decrecientes
- ❖ Además, el programa debe graficar la curva junto con los datos experimentales, preservando la información de datos crecientes y decrecientes.

**Ejercicio 2: Análisis de respuesta al escalón**

- ❖ Considere una planta cuya función de transferencia es:

$$G(s) = \frac{1000}{s^2 + 501.s + 500}$$

- ❖ Obtenga su repuesta al escalón unitario
- ❖ Agréguele ruido blanco (asuma distribución normal con  $\mu = 0$  y  $\sigma^2 = 0,01$ ).
- ❖ Elabore un programa que a partir de la respuesta al escalón ruidosa identifique un modelo de 1<sup>er</sup> orden, extraiga los atributos de la respuesta al escalón (tiempo de respuesta, ganancia en régimen, etc.), y grafique la respuesta ruidosa junto con la del modelo identificado.
- ❖ (*Opcional*) Repita lo anterior para un modelo de 2<sup>o</sup> orden, sin ceros, sobreamortiguado.

**Ejercicio 3: Análisis de respuesta en régimen sinusoidal**

- ❖ Considere la planta del ejercicio anterior.
- ❖ Obtenga la respuesta en régimen a un conjunto de 5 señales sinusoidales alrededor de la frecuencia del polo dominante (la frecuencia del polo, una octava antes y después, y una década antes y después), y amplitud 1 de pico.
- ❖ Agréguele ruido blanco a las respuestas obtenidas (asuma distribución normal con  $\mu = 0$  y  $\sigma^2 = 0,01$ ).
- ❖ Elabore un programa que a partir de las respuestas en régimen sinusoidal ruidosas, identifique un modelo de 1<sup>er</sup> orden, y grafique la respuesta en frecuencia del modelo identificado junto con los puntos ruidosos usados como datos.

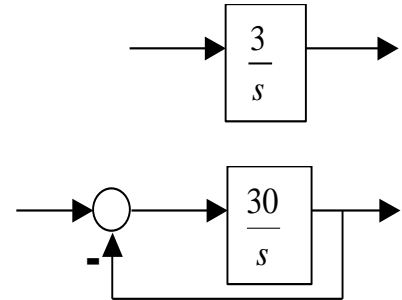
## B. Utilización de las cajas analógicas



### INFORMACION

La descripción de las Cajas Analógicas se encuentra en la sección *Equipos del Laboratorio*.

1. Ajustar la ganancia de un integrador de la caja analógica para implementar el bloque:
2. Utilice el bloque anterior para implementar el siguiente sistema:



3. Excitar el sistema implementado con una señal de la forma:  $u(t) = 0,5 \cdot \text{sen}(30 \cdot t)$ . Obtener experimentalmente la salida en régimen, compararla con la salida esperada y analizar discrepancias.

Nota: NO use la señal  $u(t)$  de la parte 3 para ajustar la ganancia, pues se pretende evaluar el ajuste de las constantes con ella.

## C. Preguntas

1. ¿Cómo utilizar las funciones de MATLAB relacionadas con los ejercicios planteados?
2. Explicar las diferentes formas de resolver los ejercicios que se analizaron.
3. ¿Cómo calibrar las constantes de las cajas analógicas?
4. ¿En qué modo deberá operar el osciloscopio a fin de visualizar correctamente las señales de trabajo: AC o DC? ¿Por qué?

Se evaluará durante la práctica sobre estos tópicos.

## D. Preinforme

Al comienzo de la práctica se deberá entregar un preinforme conteniendo lo siguiente:

Referente al uso de las herramientas de MATLAB:

- Resolución con MATLAB de los ejercicios en una memoria USB con los archivos “.m”.

Referente al uso de las cajas analógicas (2 carillas a lo sumo):

- Esquema de conexiones de los equipos.
- Ensayos a realizar para calibrar las constantes de los bloques usados.
- Pasos a seguir y precauciones a tomar en los ensayos.

El preinforme debe contener la identificación del grupo (Grupo xxx).

Si bien el preinforme será devuelto antes del fin de la práctica, si en él hay información que deban usar en el desarrollo de la misma, se recomienda tener una copia del mismo.

# PRACTICA 1: Modelado e identificación de parámetros

**Objetivo:** Construir un modelo lineal del sistema y determinar sus parámetros por experimentación.

## A. Modelo teórico

La planta física con la que se trabajará consiste de un par motor-generator acoplados por sus ejes y accionado por un driver (ver Fig. II.1).

Halle un modelo en variables de estado de este sistema, con:

- Entrada:  $V_i$ , tensión a la entrada del driver
- Salida:  $V_o$ , tensión a la salida del generador
- Estado:  $\omega$ , velocidad angular del eje

Halle la función de transferencia  $V_o(s)/V_i(s)$ .

Se deben considerar dos casos posibles, según se tenga la carga  $R_c$  conectada o no.

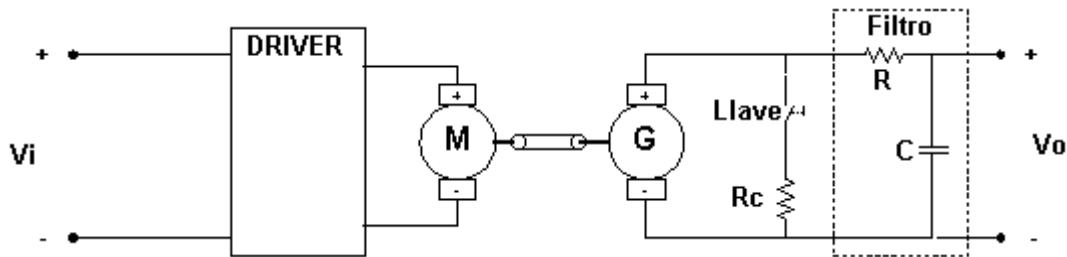
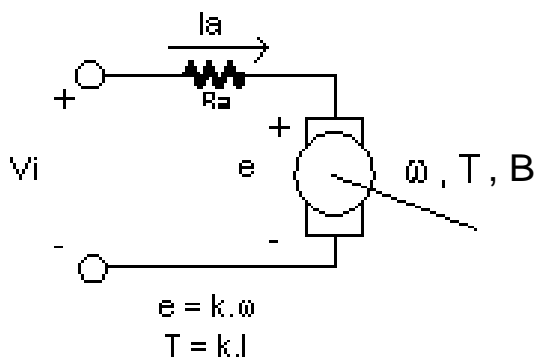


Figura II.1. Esquema de la planta.



Suposiciones:

1. Driver de ganancia  $A$ .
2. Motor y generador idénticos, según modelo de la Fig. II. 2
3. Inductancia del motor y filtro RC despreciables (constantes de tiempo del orden del milisegundo frente al polo mecánico del orden del segundo)

Figura II.2. Modelo del motor/generador.

Para completar el proceso de identificación del sistema se deben determinar los parámetros del modelo teórico mediante experimentación. La función de transferencia del sistema se puede determinar completamente por diferentes métodos:

Método 1: Respuesta estática + Respuesta en frecuencia

Método 2: Respuesta escalón

Se deberá identificar la función de transferencia del sistema según estos dos métodos y analizar las diferencias entre ambos resultados.

Por último, se deberá hallar una única representación de la función de transferencia del sistema, justificando la elección de la misma.

Los ensayos y el proceso de identificación se deberán realizar para el sistema **con carga y sin carga**, obteniéndose una función de transferencia para cada caso.

### **Registro de número de planta**

Los ensayos realizados le permitirán identificar un modelo para la planta con la que trabaja. En las próximas prácticas deberá trabajar con la misma planta, por lo cual debe ANOTAR EL NUMERO DE CAJA DE LA PLANTA.

## **B. Ensayos**

Los ensayos a realizar se describen a continuación.



**ATENCIÓN** La tensión aplicada al sistema ( $V_i$ ) no debe superar los **3 V**.

### **Registro del sentido de giro**

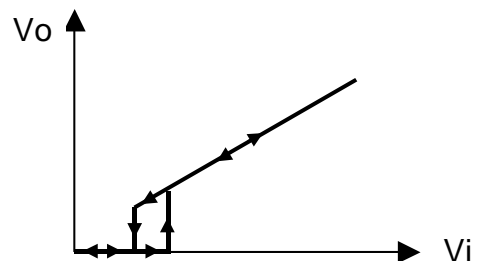
Se identificará un modelo para la planta girando en un solo sentido. Como el comportamiento no será necesariamente el mismo cuando gira en un sentido o en el otro, debe ANOTAR EL SENTIDO DE GIRO PARA EL CUAL SE DETERMINA EL MODELO.

### **Ensayo #1: Respuesta estática**

Se aplicarán diferentes tensiones de entrada constantes y se registrará el valor de la tensión de salida en régimen. Se deberá tener en cuenta la limitación en la máxima tensión aplicada al motor.

Un esquema de la curva típica de respuesta estática se muestra en la Fig. II.3. En ella se aprecian dos fenómenos singulares:

- Zona muerta: parte de la curva con tensión de entrada no nula y salida nula.
- Histéresis: diferentes curvas entrada-salida para tensiones de entrada crecientes y decrecientes.



**Figura II. 3.** Esquema de la curva típica de respuesta estática.

### *Procedimiento*

1. Identificar los puntos característicos de los fenómenos de zona muerta e histéresis.
2. Relevar dentro la zona de funcionamiento del motor, de 5 a 7 puntos equiespaciados desde la tensión de arranque hasta la máxima tensión admisible de la planta.
3. Relevar dentro la zona de funcionamiento del motor, de 5 a 7 puntos equiespaciados desde la máxima tensión admisible hasta la tensión de parada del motor.
4. Realizar el procedimiento para el sistema con y sin carga.



**IMPORTANTE** Como se observa de este ensayo, existe una zona de la curva de respuesta estática con comportamiento claramente no lineal, por lo que dicha zona no podrá ser bien representada por un modelo lineal. Para los siguientes ensayos tenga en cuenta que se desea identificar un modelo representativo de la zona de funcionamiento de la planta.

### ***Ensayo #2: Respuesta en frecuencia***

Se aplican a la entrada del sistema una serie de señales sinusoidales que cubran el rango de frecuencias de interés y se registran las señales de salida en régimen.

### *Procedimiento*

1. Basados en el resultado de la respuesta estática, hallar la ganancia estática (en continua) del sistema.
2. Calcular la ganancia del sistema a la frecuencia del polo.
3. Excitar el sistema con señales sinusoidales variando la frecuencia hasta encontrar el polo (de acuerdo a la ganancia calculada). Relevar este punto. *Recuerde que debe trabajar dentro de la zona de funcionamiento del motor.*
4. Relevar al menos 3 puntos de la respuesta en frecuencia hasta una década por debajo de la frecuencia de polo y al menos 3 puntos hasta una década por encima. Para ello adquiera las señales de entrada y salida (un n<sup>o</sup> de ciclos razonable), mediante el sistema de adquisición, para cada uno de los puntos.
5. Realizar el procedimiento para el sistema con y sin carga.

### ***Ensayo #3: Respuesta escalón***

Se aplica una señal tipo escalón a la entrada del sistema y se registra la salida.

### *Procedimiento*

1. Excitar el sistema con señales de tipo escalón que permitan observar adecuadamente la evolución del sistema. *Recuerde que debe trabajar dentro de la zona de funcionamiento del motor.*
2. Adquiera las señales de entrada y salida, mediante el sistema de adquisición, para varios escalones crecientes y decrecientes.
3. Comprobar que la ganancia en régimen concuerda con la obtenida en el ensayo de respuesta estática.
4. Realizar el procedimiento para el sistema con y sin carga.

## C. Identificación

Con los datos experimentales relevados en esta práctica, se deberá realizar la identificación de parámetros del modelo teórico. Como se mencionó anteriormente, se tienen dos métodos independientes para realizar la identificación:

Método 1: Respuesta estática + Respuesta en frecuencia

Método 2: Respuesta escalón

Cada uno de ellos permite hallar una función de transferencia, debiéndose analizar las diferencias entre ambas.

Debido a las características de la planta y de los equipos disponibles para los ensayos, el método 1 resulta más impreciso: pocos puntos relevados, rango de frecuencias demasiado estrecho, potencia de ruido excesiva. Por estas razones, **se tomará como función de transferencia del sistema la obtenida de la respuesta escalón.**

El proceso de identificación termina con la obtención de una función de transferencia para el sistema con carga y otra para el sistema sin carga.

Una parte importante del proceso de identificación es el procesamiento de las señales experimentales, esto incluye entre otras cosas:

- Filtrado (promedio de valores en régimen, filtrado de sinusoides, etc.)
- Ajuste de curvas

*Consejos para una correcta identificación*

- Realice la selección de las curvas a ajustar según una base teórica, evite usar polinomios de alto orden para identificar curvas de ecuación conocida;
- Utilice la mayor cantidad posible de puntos experimentales cuando proceda a identificar o ajustar una curva;
- Siempre contraste en una misma gráfica los puntos experimentales contra la curva ajustada a fin de visualizar posibles errores.



**IMPORTANTE** Verificación del modelo identificado.

Se deberán contrastar las gráficas de respuesta estática, respuesta escalón y diagramas de Bode del modelo teórico identificado contra los puntos experimentales.

## D. Preinforme

Se deberá entregar un preinforme al comienzo de esta práctica conteniendo:

- Modelos teóricos para el sistema con y sin carga:
  - Modelo en variables de estado
  - Función de transferencia
- Análisis de las variaciones del sistema con y sin carga en:
  - Respuesta en frecuencia.
  - Respuesta escalón.
- Justificación de la zona muerta y la histéresis en la respuesta estática.

## E. Preguntas

Se realizará una evaluación escrita al comienzo de la práctica con alguna de las preguntas que siguen:

### *Modelado*

1. ¿Qué forma tiene la función de transferencia del sistema? ¿Cómo varían los parámetros de la misma con y sin carga?
2. Dibujar los diag. de Bode del sistema con y sin carga. Indicar diferencias entre ambos.
3. Dibujar las respuestas escalón del sistema con y sin carga. Indicar diferencias entre ambas.

### *Respuesta estática*

4. ¿Cómo justifica los fenómenos de histéresis y zona muerta?
5. ¿Qué representa la pendiente de la zona aproximadamente lineal de la curva entrada-salida?
6. ¿Existen diferencias entre esta pendiente y el cociente salida-entrada? ¿Cómo afecta esto al proceso de identificación de parámetros?

### *Respuesta en frecuencia*

7. ¿En qué modo deberá operar el osciloscopio a fin de visualizar correctamente las señales de trabajo: AC o DC? ¿Por qué?
8. ¿Qué tipo de señal debe ser colocada a la entrada de la planta para relevar la respuesta en frecuencia dentro de la zona de funcionamiento? ¿Cómo influye la elección de los parámetros de esta señal en la obtención de una respuesta en frecuencia representativa?

### *Respuesta escalón*

9. ¿Qué tipo de señal debe ser colocada a la entrada de la planta para relevar la respuesta escalón dentro de la zona de funcionamiento? ¿Cómo influye la elección de los parámetros de esta señal en la obtención de una respuesta escalón representativa?

## F. Sobre el informe final

No se entregará informe parcial de esta práctica. El informe final deberá contener, como mínimo, los siguientes puntos tratados en esta práctica:

- Modelos teóricos para el sistema con y sin carga:
  - Modelo en variables de estado
  - Función de transferencia
- Número de planta utilizada y sentido de giro elegido
- Datos experimentales obtenidos en los diferentes ensayos
- Explicación del tratamiento de las señales experimentales
- Explicación del proceso de identificación
- Funciones de transferencia identificadas para el sistema con y sin carga por cada uno de los métodos así como la selección final junto con los criterios de selección
- Gráficas superpuestas de puntos experimentales y curvas teóricas del modelo identificado para:
  - Respuesta estática
  - Diagramas de Bode, módulo y fase
  - Respuesta escalón



## **PRACTICA 2:**

### **Diseño y simulación de controladores asistido por computadora**

*Objetivo:* Diseñar controladores para que el sistema realimentado cumpla con ciertos requerimientos de desempeño, usando una metodología de diseño asistido por computadora.

*Nota:* Debido a que esta práctica no requiere experimentación con la planta, la asistencia no es obligatoria, pudiéndose realizar fuera del Laboratorio. De todas formas, las computadoras del Laboratorio estarán disponibles durante el horario de la práctica.

#### **A. Diseño de controladores asistido por computadora**

Se pretende controlar la planta para que cumpla con ciertas especificaciones de funcionamiento relativas a la velocidad de respuesta y el error en régimen. Para ello se deberán diseñar los controladores adecuados haciendo uso de las herramientas de simulación y control de MATLAB.

*Consejos para un correcto diseño*

- Traducir los requerimientos exigidos al dominio más adecuado (frecuencia, tiempo, patrón de polos y ceros, etc.)
- Comenzar con controladores simples e incrementar la complejidad a medida que la aplicación lo requiera.
- La adición de polos y/o ceros al controlador deberá realizarse con criterio.
- Donde no se tengan fórmulas teóricas, realizar el diseño simulando en MATLAB. Sin embargo, se debe aprovechar la teoría al máximo para acotar o guiar las simulaciones.
- El diseño de los controladores se hace sobre la base de un modelo de la planta. El sistema que se pretende controlar no es el sistema simulado sino el real. Debido a que siempre existen diferencias entre el modelo y la planta se deben diseñar los controladores con márgenes de seguridad. Un diseño sobre el "límite" de los requerimientos seguramente fracase en la práctica.

#### **IMPORTANTE**



El **controlador 1** deberá comportarse adecuadamente tanto para el sistema sin carga como con carga (**mismo controlador para ambos casos**), por lo cual se deberá analizar el peor caso.

Para evaluar el desempeño del sistema controlado, se utilizará la **misma señal a la entrada del sistema controlado**, tanto para el sistema con y sin carga.

#### **B. Especificaciones de diseño**

Los controladores a diseñar y las correspondientes especificaciones de diseño y funcionamiento del sistema en lazo cerrado son:

**Controlador 1**

- Estructura: controlador serie proporcional.
- Reducir el tiempo de levantamiento a la mitad o menos con relación al sistema sin controlar (con y sin carga).
- Respetar las limitaciones de voltaje del motor.
- El sistema controlado debe poder admitir a la entrada señales del tipo escalón, de hasta 1 V. Se calculará el error en régimen estacionario ante una entrada escalón unitario.

**Controlador 2**

- Estructura: libre, implementable con una caja analógica.
- Reducir el tiempo de levantamiento a la mitad o menos con relación al **sistema sin carga** a controlar.
- Reducir el error en régimen estacionario ante una entrada escalón a menos del 5 %.
- Tener un máximo sobretiro menor al 10 %.
- Respetar las limitaciones de voltaje del motor.
- El sistema controlado debe poder admitir a la entrada señales del tipo escalón, de hasta 1 V.



**ATENCIÓN** Para el diseño del **controlador 2**, se admitirá que se supere la máxima tensión aplicada a la planta (3 V) por un tiempo no mayor a 50 ms y con un valor máximo de 3,5 V.



**ATENCIÓN** Mediante las simulaciones en MATLAB, es posible observar la señal de voltaje que será aplicada al sistema para no exceder el voltaje máximo del motor. Recuerde que lo que interesa es el voltaje total que se le aplica al motor y no solamente la pequeña señal.



**IMPORTANTE** Si trabaja con las máquinas de Laboratorio, no deje nada en el disco duro. Cuando vuelva, quizás no esté. Guarde copia de los archivos en su memoria USB.

**C. Sobre el informe final**

El informe final deberá contener los siguientes puntos concernientes a esta práctica:

- Metodología de diseño de los controladores incluyendo las diferentes variantes analizadas y por qué fueron desechadas.
- Controladores finales diseñados.
- Simulación del sistema controlado:
  - Gráficas de la respuesta escalón del sistema controlado junto con el sistema original (con y sin carga en el caso del controlador 1; sólo sin carga para el controlador 2)

## **PRACTICA 3:**

### **Implementación y evaluación de controladores**

*Objetivo:* Implementar los controladores diseñados y contrastar los resultados experimentales y teóricos evaluando el desempeño de los mismos.

#### **A. Implementación**

La implementación de los controladores se hará con las cajas analógicas.

##### *Consejos prácticos*

- Recuerde los procedimientos y precauciones aprendidos en la Práctica 0 para el ajuste de ganancias de los bloques proporcionales e integrales.
- Verifique el correcto comportamiento del controlador previo a la conexión con la planta mediante señales de prueba (sinusoides, por ejemplo).
- Recuerde la limitación en la tensión del motor.

#### **B. Ensayos**

1. Conecte el sistema completo en lazo cerrado. Una vez verificadas las conexiones, solicite la presencia de un docente para realizar la prueba de desempeño.
2. Registre la respuesta del sistema frente a entradas del tipo escalón, tanto para el sistema con y sin carga, en forma análoga a lo realizado en la Práctica 1.
3. Realice medidas aproximadas de los parámetros necesarios para verificar el cumplimiento de los requerimientos de control.
4. En caso de no satisfacer los mismos, verifique la implementación realizada. En caso de no detectar errores, proceda a modificar los parámetros del controlador con algún criterio. Una vez logrados los requerimientos pedidos, registre también los valores finales de los parámetros del controlador. Se deberán justificar las posibles modificaciones realizadas.

#### **C. Preinforme**

A modo de preinforme, al comienzo de la práctica se deberá entregar:

- Metodología de diseño de los controladores incluyendo las diferentes variantes analizadas y por qué fueron desechadas.
- Controladores finales. Indicar los valores finales de diseño y los valores esperables de las magnitudes que guiaron el diseño, los rangos donde pueden variar los parámetros del controlador, y cómo se implementarán con las cajas analógicas.

## **D. Preguntas**

### *Diseño de Controladores 1 y 2*

1. ¿Qué requerimientos debe cumplir el sistema en lazo cerrado?
2. Dibujar el diagrama de bloques del sistema realimentado.
3. ¿Cómo se diseñó el controlador?
4. ¿Qué problemas puede presentar el uso del Controlador 1 con las especificaciones del Controlador 2?
5. ¿Cómo se implementará el controlador diseñado?

Se realizará una evaluación al comienzo de la práctica sobre estos tópicos.

## **E. Sobre el informe final**

El informe final deberá incluir:

- Gráficas de los ensayos realizados en comparación con lo previsto en la simulación.
- Análisis del cumplimiento de las especificaciones de funcionamiento y restricciones.
- Comentarios sobre las diferencias observadas.
- En caso de haber corregido parámetros de algún controlador, registro de los valores finales analizando las diferencias con los valores iniciales.

# Apéndice

## ***Sobre la escritura de informes***

- Como ingenieros, los informes son la forma de documento más común que escribiremos.
- La escritura de informes es un arte que a menudo pasamos por alto, pero que en ocasiones puede tener un fuerte impacto en nuestro progreso.
- Nuestros informes encuentran su camino hasta el escritorio de un superior más rápido que nosotros mismos.

### ***Por qué escribir informes***

Listamos aquí algunas de las razones:

- (anecdótico) como estudiante debes hacerlo para aprobar el curso;
- para que otros ingenieros puedan conocer el resultado de un experimento;
- para dejar un registro del trabajo hecho para que otros puedan continuarlo;
- como registro para uso propio si el trabajo debe repetirse en un futuro;
- requerido por razones legales (contratos, leyes);
- para dar cierre a un proyecto.

### ***Tipos de informe***

Listamos aquí diferentes tipos de informe (existen otros):

- Laboratorio - describen uno o más experimentos, ensayos o pruebas, los resultados, y las conclusiones extraídas de ellos.
- Consultoría - resumen de detalles, resultados de pruebas, observaciones, y un conjunto de conclusiones. Típicamente contienen recomendaciones.
- Proyecto - descripción del trabajo realizado en un proyecto para informar a otros ingenieros. Debe permitirles continuar el proyecto.
- Investigación - resumen de los avances actuales en un tema.
- Interno - informe para poner al día a supervisores y otros, del progreso de un proyecto.

### ***Informe de laboratorio***

- Propósito: Estos informes deben describir los procedimientos y resultados en detalle. También deben contener el análisis y las conclusiones. La completitud de detalles permitirá (al autor o a otros) revisar y verificar la correctitud de lo que se ha hecho. Han sido utilizados por cientos de años y son aceptados como una forma de evidencia científica y legal. Es absolutamente inaceptable incluir informaciones erróneas o dejar afuera pasos o datos importantes.
- Contenido: Aspectos que necesariamente deben figurar en un informe de laboratorio.
  - Carátula - marco del trabajo, título, autor, fecha. Para aclarar para qué proyecto, investigación (asignatura) se realizó, qué contiene, quién y cuándo se hizo.
  - Propósito - breve descripción que permite tener una idea general del objetivo.
  - Teoría - una revisión de la teoría aplicable y los cálculos necesarios.
  - Equipamiento - lista del equipo particular utilizado. Permite replicar el trabajo y localizar problemas.
  - Procedimiento - operaciones secuenciales que describen qué fue hecho durante un ensayo. El nivel de detalle debe ser el suficiente como para replicarlo.

- Resultados - presentados en forma de tablas, gráficas, etc., según corresponda. Deben anotarse los eventos "anómalos" (alimentación inestable, humedad alta, etc.)
  - Discusión - Revisión de los resultados para evaluar tendencias, desempeño, procedimiento, etc.
  - Conclusiones - Resumen de los resultados más significativos, cumplimiento o no de los objetivos, aceptación o rechazo del diseño.
- Nota: Los informes son más fáciles de escribir si uno prepara los cálculos, las gráficas, etc., antes de empezar a escribir...

## ***Modelo de Informe de Laboratorio***

### ***Carátula***

- "Taller laboratorio - Introducción a la Teoría de Control"
- "Informe"
- "Año 20\_\_"
- "Grupo NN - (lista de integrantes con teléfonos y/o e-mails)"

### ***Tabla de contenidos***

#### ***Introducción***

- Descripción general de la práctica (no más de 250 palabras)

#### ***Modelado***

- Descripción de la planta
- Modelo en variables de estado (con y sin carga)
- Funciones de transferencia
- Análisis de las variaciones sistema con y sin carga, en sus respuestas en frecuencia y al escalón (incluir gráficas y tablas de atributos -tiempo de levantamiento, ganancia en régimen, etc.- comparativas)
- Justificación teórica de la zona muerta y la histéresis en la curva de característica estática. Análisis de su incidencia en la validez del modelo encontrado y de las consideraciones a la hora de realizar los ensayos.

#### ***Identificación***

- Preparado: N° identificador de la planta utilizada, sentido de giro, ajustes previos, etc.
- Ensayo XX: Descripción del procedimiento (conexión y configuración de los equipos, señales de entrada y salida, cómo se midió y/o registró, reporte de condiciones particulares, etc.); datos experimentales (tabla y/o gráfica); tratamiento de los datos (justificación, explicación del procedimiento, resultados)
- Identificación por el método YY: procedimiento, resultados, contrastación con datos experimentales
- Selección del modelo: comparación de modelos identificados, justificación de la selección final.

### ***Diseño y simulación de controladores***

- Controlador ZZ: análisis de las especificaciones de diseño, metodología de diseño; (para el Controlador 2) variantes analizadas y justificación de la elección del diseño final; simulaciones de la respuesta del sistema controlado (evidenciar el cumplimiento de las especificaciones de diseño).

### ***Implementación y evaluación de controladores***

- Sistema con el controlador ZZ: implementación del controlador usando las cajas analógicas (conexiones, valores de las constantes de los bloques usados, procedimiento de ajuste, procedimiento de prueba); ensayos de respuesta al escalón con y sin carga (similar a lo descrito en "Identificación"); análisis del cumplimiento de las especificaciones de diseño (gráficas comparativas entre simulación y respuesta real de las señales relevantes, y tablas de atributos de respuesta al escalón, etc.); si no fue exitoso, criterios utilizados para el rediseño (o reajuste) del controlador y repetir implementación, ensayos, etc.; conclusiones.

### ***Conclusiones y evaluación***

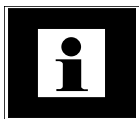
- Evaluación de los resultados obtenidos
- ¿Qué aprendí en esta práctica? (no más de 200 palabras)
- Auto evaluación del desempeño del grupo (no más de 100 palabras)

### ***Apéndices***

- Práctica 0: explicación breve y clara de los algoritmos de solución a los problemas planteados
- Descripción detallada de los archivos entregados en medio no impreso

### ***En medio no impreso***

- Archivos de datos adquiridos y procesados
- Archivos de programa de procesamiento
- El informe final en formato pdf



#### **INFORMACION**

El informe final, sin contar los apéndices, no debe superar las 40 páginas. Por encima de las 45 páginas se descontarán puntos.