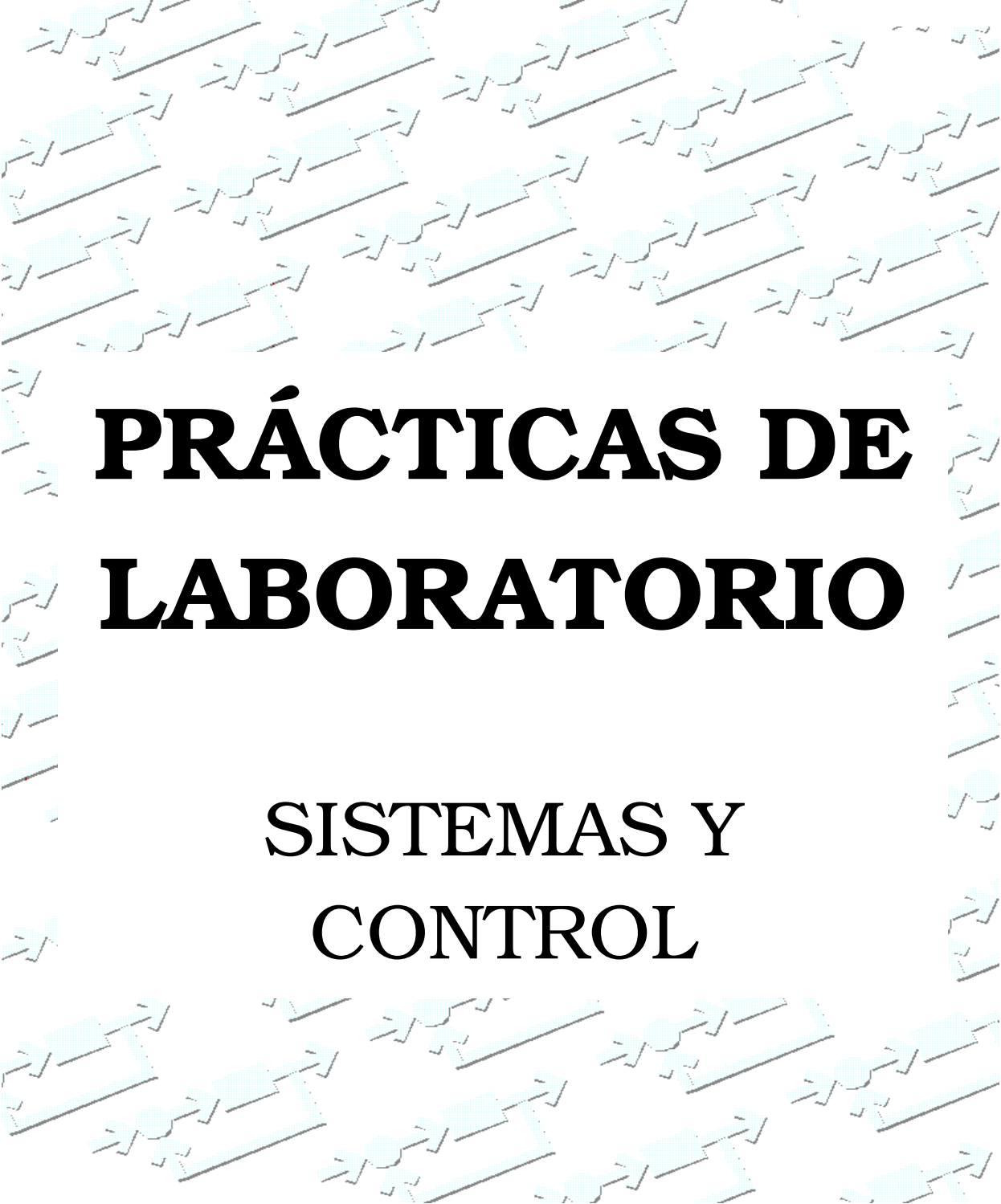


**Departamento de Sistemas y Control**

**Instituto de Ingeniería Eléctrica**

**Facultad de Ingeniería - IIE - Sistemas y Control**

Edición 2023



# **PRÁCTICAS DE LABORATORIO**

## **SISTEMAS Y CONTROL**

# Introducción

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

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

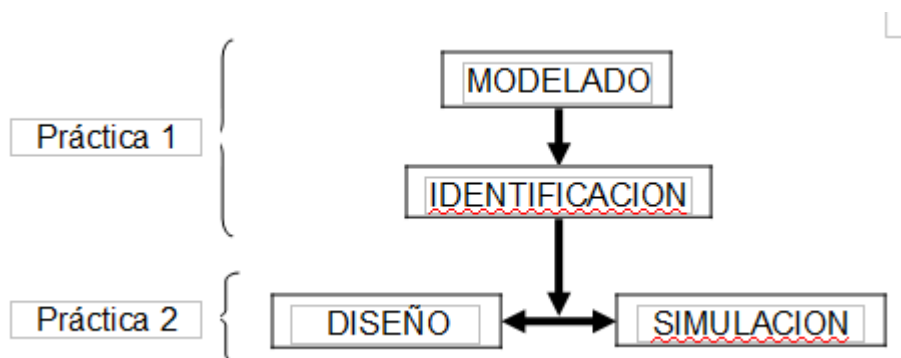
Si bien el Laboratorio se compone de varias prácticas, todas ellas integran un único proceso de ingeniería mediante el cual se busca controlar una planta física. El objetivo final de este proceso es implementar un controlador para dicha planta, de tal forma que ésta cumpla ciertos requerimientos específicos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

Practica 1: Modelado e identificación de parámetros

Práctica 2: Diseño de controladores y Simulación asistida por computadora

Durante la primer práctica se construye el modelo matemático de la planta a controlar, y en la segunda se diseña el controlador y se simula el comportamiento del sistema controlado.

Estas prácticas se desarrollarán con el objetivo de controlar una planta simulada por software, que simula el comportamiento de una planta real (ver fig. I.1) en lugar de hacerlo sobre la planta física.



Este concepto de proceso integral de diseño 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 (resumido) de la misma que será revisado durante la práctica. Concluidas las prácticas de Laboratorio y basándose en los preinformes y los resultados de cada práctica, se deberá realizar un informe completo del Laboratorio considerando a éste como un único proceso y no como la unión de prácticas independientes.

## ***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 | Preguntas durante la práctica   |
| Preinformes                                       | Corrección en el transcurso del laboratorio   |
| Desempeño durante la práctica                     | Cumplimiento de lo encomendado en cada práctica<br>Participación uniforme de todos los integrantes del grupo<br>Capacidad de trabajo grupal, independiente del docente  |
| Informe final                                     | Calidad de las actividades realizadas<br>(ensayos, tratamiento y análisis de datos, diseño e implementación de controladores, etc.)<br>Calidad del reporte de las actividades realizadas<br>(claridad de redacción, uso correcto de imágenes, etc.)<br>Correcto manejo de la información y exposición de conclusiones<br>Calidad de la presentación |

## ***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. Aunque las prácticas se desarrollarán sobre plantas simuladas (que simulan un dispositivo físico), se mantienen estos avisos cuando se requiere que la señal simulada cumpla las advertencias.



### **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: Planta a controlar**

## Planta: Simulador de Par Motor-Generador y Driver

### A. Descripción

La planta simulada representa el comportamiento físico real de “cajas” experimentales del Lab. de Control. 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). Los bornes para conectar la tensión de entrada al driver, y para medir la tensión de salida del generador, se encuentran accesibles en el frente de la caja.

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

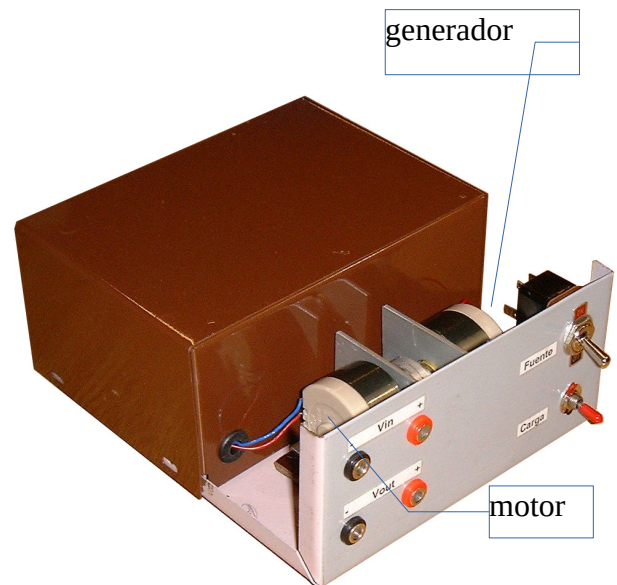


Figura I.1. Caja del par motor-generador.

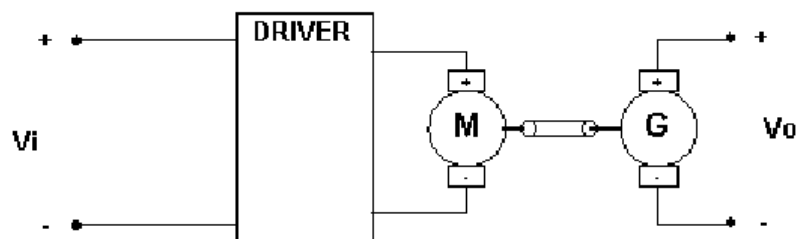


Figura I.2. Diagrama esquemático del par motor-generador y su driver.

Este dispositivo puede modelarse bastante bien como un sistema dinámico lineal, dentro de un amplio rango de velocidades y voltajes. Excepto, en los momentos en que la velocidad pasa por un valor nulo, en cuyo caso la fricción estática impide que el motor vuelva a girar, hasta no aplicar un voltaje suficiente grande como para iniciar su movimiento otra vez (ver apéndice). Esta no-linealidad se evita si se logra evitar que la velocidad pase por valores nulos.

Por ello la **zona de funcionamiento del sistema** debe evitar la detención del par motor-generador, si se quiere tener un comportamiento próximo a la linealidad.

## B. Driver

El driver es un circuito eléctrico capaz de accionar en forma eficiente un motor de corriente continua. A los efectos del modelado en baja frecuencia del driver, este se puede representar mediante una ganancia proporcional entre su entrada y su salida. Es decir se comporta como un amplificador.



Figura I.3. Frente del par motor-generator y driver.



**ATENCIÓN** La planta real tiene una tensión máxima de alimentación de 3V.

Cada una de las plantas simuladas tiene dado un modelo no lineal, de forma y parámetros desconocidos para el grupo. Denominaremos este modelo como “modelo de referencia”.

Como parte del trabajo de Laboratorio, se buscará aproximar este modelo de referencia con un sistema lineal.

## **Sección II: PRÁCTICAS**



# **PRACTICA 1:**

## **Modelado e identificación de parámetros**

*Objetivos: 1) Construir un modelo lineal del sistema y determinar sus parámetros por experimentación.  
2) Familiarización con herramientas de simulación digital.*

Esta práctica consiste en la realización de 3 ejercicios que serán explicados más adelante en este Manual. El objetivo principal es construir un modelo matemático de la planta a controlar.

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 usen gráficas, las curvas en una misma figura deben ser claramente identificadas.

### **A. Herramientas de Software.**

En esta primer etapa de la práctica se desarrollarán herramientas de cálculo útiles para la segunda parte. Los estudiantes pueden apoyarse para este cálculo en diversas herramientas de software, por ejemplo Matlab, Scilab, Python.

Pueden usarse otras herramientas de cálculo o simulación siempre que esto quede documentado.



#### **IMPORTANTE**

Los programas generados en los ejercicios para el objetivo de identificación y análisis de datos deberán acompañar el informe final.



#### **INFORMACION**

Tanto MATLAB como Scilab, por ejemplo, cuentan con una serie de funciones que pueden ser de gran utilidad para estos ejercicios:

- butter (MATLAB), zpbutt (Scilab) – Diseño de filtros de Butterworth
- filter (MATLAB & Scilab) – Filtrado de señales
- polyfit (MATLAB) – Ajuste de polinomios
- fminsearch (MATLAB & Scilab) – Minimización de funciones de varias variables
- lsim (MATLAB), csim (Scilab) – Simulación de un sistema lineal
- tf (MATLAB), syslin (Scilab) – Definir función de transferencia

Esto es información, no se exige que usen estas.

**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) constantes 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 ajustada, 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:

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

- ❖ Obtenga su respuesta 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 (constante de tiempo de respuesta, ganancia en régimen, tiempo de asentamiento, etc.), y grafique la respuesta ruidosa junto con la del modelo identificado.

## Identificación del Sistema

### B. Modelo teórico

La planta física con la que se trabajará consiste de un par motor-generador 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  $V_o(s)/V_i(s)$ .

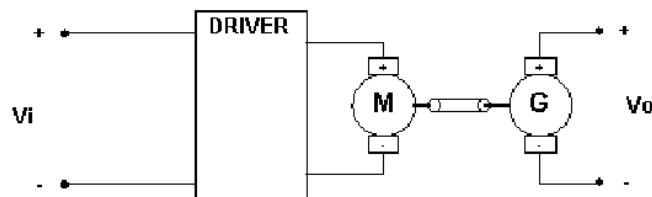
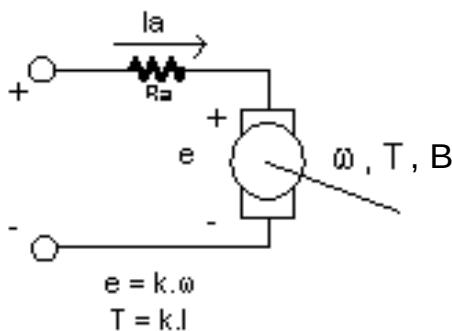


Figura II.1. Esquema de la planta.



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 y del 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. En esta práctica se usará la identificación del sistema analizando la respuesta a escalón de un sistema simulado que incluye el ruido de medida.

Para ello, los docentes suministrarán al grupo los datos de dos ensayos:

- 1) la curva de respuesta estática
- 2) la respuesta escalón, suministrada como dos series de datos: la entrada cuadrada entregada al sistema simulado (modelo de referencia), y la salida del sistema simulado (modelo de referencia) a esa onda cuadrada.

Se deberá identificar la función de transferencia del sistema a partir de estos datos.

Cada grupo tendrá datos de un sistema (par motor-generador) distinto, por lo que sus modelos serán distintos.

## C. Identificación

### ***Ejercicio 3: Análisis de respuesta al escalón***

Con los datos experimentales entregados al grupo en esta práctica, se deberá realizar la identificación de parámetros del modelo teórico.

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

- Filtrado (por ejemplo: promedio de valores en régimen, 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 escalón del modelo teórico identificado contra los datos suministrados al grupo (modelo de referencia).

## D. Preinforme

No se requerirá preinforme, pero se sugiere enfáticamente llegar a la práctica con lo siguiente:

Referente al uso de las herramientas de software:

- Resolución de los ejercicios 1 y 2, los programas usados almacenados en archivos.

Referente a la identificación

- Modelo teórico para el sistema:

- Modelo en variables de estado
- Función de transferencia teórica

## **E. Preguntas**

1. Explicar las diferentes formas de resolver los ejercicios que se analizaron.
2. ¿Qué forma tiene la función de transferencia del sistema?

*Respuesta estática*

3. ¿Cómo justifica los fenómenos de histéresis y zona muerta?
4. ¿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?

Se evaluará durante la práctica sobre estos tópicos.

## **F. Sobre el informe final**

No se entregará informe parcial de esta práctica. Como se indica más adelante, el informe final deberá contener, como mínimo, los siguientes puntos tratados en esta práctica:

- Modelos teóricos para el sistema:
  - Modelo en variables de estado
  - Función de transferencia
- Explicación del tratamiento de las señales experimentales
- Explicación del proceso de identificación
- Función de transferencia identificada
- Gráficas superpuestas de puntos experimentales y curva teórica del modelo identificado para la respuesta a escalón

## **PRACTICA 2:**

# **Diseño de controladores y Simulación asistida por computadora**

*Objetivo:* Diseñar dos controladores para que el sistema realimentado cumpla con ciertos requerimientos de desempeño, usando una metodología de diseño discutida en el curso.

### **A. Diseño de controladores.**

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 de acuerdo a metodologías vistas en el curso. Se puede hacer uso de herramientas de simulación por software como las de Matlab, Scilab, Python, etc. Lo que no se permite es que el diseño lo realicen herramientas de diseño por software ya disponibles.

*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. Es decir, debe haber fuertes razones para agregar complejidad al controlador.
- Donde no se tengan fórmulas teóricas, realizar el diseño simulando el funcionamiento. 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 identificado por el grupo. El sistema que se pretende controlar es el sistema que generó los datos que le fueron proporcionados al grupo. Un diseño muy sobre el "límite" de los requerimientos seguramente fracase en la práctica.

### **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 con realimentación unitaria.
- Reducir el tiempo de levantamiento a la mitad o menos con relación al sistema sin controlar.
- Respetar las limitaciones de voltaje del motor.
- El sistema controlado debe poder admitir a la entrada señales del tipo escalón, de hasta 1 V de amplitud. Se calculará el error en régimen estacionario ante una entrada escalón unitario.

## Controlador 2

- Estructura: libre, implementable con controlador sencillo (no alto orden).
- Reducir el tiempo de levantamiento a la mitad o menos .
- 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 de amplitud.



**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 4 V.



**ATENCIÓN** Mediante las simulaciones en MATLAB, Scilab u otro software, 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.

## Ejercicio con controladores

Estos dos controladores se simularán aplicados

- 1) al modelo identificado por el grupo, y
- 2) aplicados al “modelo de referencia”. Para esto el grupo entregará a los docentes el controlador a emplear (estructura, parámetros) así como la señal de entrada para hacer la prueba indicada de respuesta a escalón (punto de operación, altura de los escalones)

Se discutirán los resultados en ambos casos

## C. Preinforme

A modo de preinforme, al comienzo de la práctica se deberá indicar (en forma breve):

- Metodología de diseño de los controladores incluyendo las diferentes variantes analizadas y por qué fueron desechadas.

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 si se quiere cumplir con las especificaciones del Controlador 2?

## **D. 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:
  - Gráfica de la respuesta escalón del sistema controlado junto con el sistema original (sistema simulado del grupo)
  - Gráficas de los ensayos realizados sobre el “modelo de referencia” y su comparación con lo previsto en la simulación del modelo identificado.
- 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 1

## ***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 del conocimiento 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
- Función de transferencia

#### **Identificación**

- Identificación por el método de la respuesta a escalón: procedimiento, resultados, contrastación con datos experimentales

#### **Diseño y simulación de controladores (con el sistema simulado que identificó el grupo)**

- Controlador XX: 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).

#### **Evaluación de controladores (con el sistema simulado por los docentes, modelo de referencia)**

- Sistema con el controlador YY: ensayo de respuesta al escalón (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**

- 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 simulados
- Archivos de programa de procesamiento
- El informe final en formato pdf



### **INFORMACION**

El informe final, sin contar los apéndices, no debe superar las 18 páginas.

## Apéndice 2

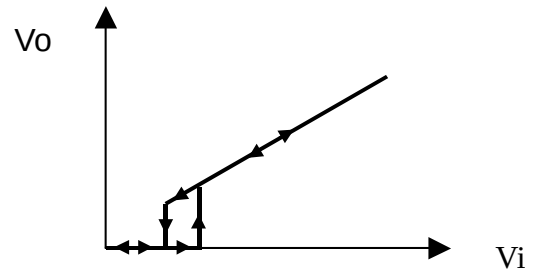
### **Respuesta estática del motor-generator**

Para ensayar el comportamiento del par motor-generator se aplican diferentes tensiones de entrada constantes y se registra el valor de la tensión de salida en régimen.

Esto permite conocer la relación entrada-salida, cuando la entrada es una señal constante.

Un esquema de la curva típica de respuesta estática se muestra en la Fig. A2.3. 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 A2.3.** Esquema de la curva típica de respuesta estática.

Esto se debe a que estando el motor detenido es necesario cierto voltaje mínimo para que se produzca el par necesario para vencer la fricción estática.

También permite ver en qué condiciones se detiene el motor y queda momentáneamente trabado, hasta lograr moverse otravez.