

Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán

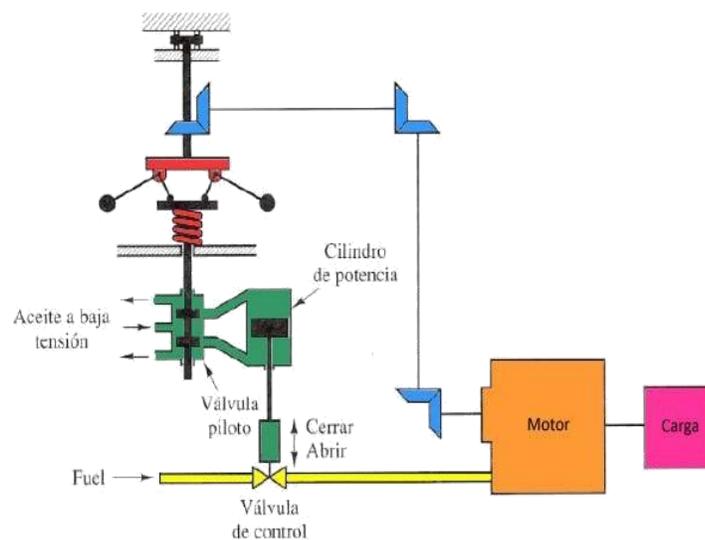


Departamento: Ingeniería
Sección Electrónica

Manual del Laboratorio de Ingeniería de Control

Clave Asignatura: 1627

Clave Carrera: 130



Autores:

M. en TI. Jorge Buendía Gómez

M. en C. Leopoldo Martín del Campo Ramírez

Fecha de Elaboración: 2014

Fecha de Modificación: Junio 2024

Semestre 2025-1

Laboratorio de Ingeniería de Control

Índice

Índice		2
Prólogo		3
Reglamento		6
Lista global de materiales		8
Práctica 0	Introducción	9
Práctica 1	Sistema de Lazo Abierto. 1.1. Definiciones básicas de sistemas de control. 1.2. Sistemas de control de lazo abierto y sistemas de control de lazo cerrado.	16
Práctica 2	Sistema de Lazo Cerrado. 1.1. Definiciones básicas de sistemas de control. 1.2. Sistemas de control de lazo abierto y sistemas de control de lazo cerrado.	22
Práctica 3	Modelado de sistemas con amplificadores operacionales. 1.3. Representación de sistemas mediante diagramas de bloques. 1.4. Representación de sistemas mediante reogramas.	27
Práctica 4	Estabilidad. 3.1. Concepto de Estabilidad	32
Práctica 5	Respuesta en el tiempo de sistemas de primer orden. 4.0. Análisis de respuesta en el tiempo.	37
Práctica 6	Emulación de sistemas de segundo orden. 4.0. Análisis de respuesta en el tiempo.	42
Práctica 7	Control de posición con controlador proporcional. 6.2. Acciones básicas de control. 6.2.2 Control proporcional (P).	49
Práctica 8	Controlador proporcional integral. 6.2. Acciones básicas de control. 6.2.5 Control proporcional integral (PI).	55
Práctica 9	Controlador proporcional integral y derivativo. 6.2. Acciones básicas de control. 6.2.7 Control proporcional integral y derivativo (PID).	60
Práctica 10	Respuesta en Frecuencia. 5.1. Obtención de la respuesta en frecuencia de funciones de transferencia de sistemas de control. 5.2. Compensación empleando técnicas de respuesta en frecuencia.	64

Laboratorio de Ingeniería de Control

Prólogo

Objetivos generales de la asignatura

- Al finalizar el curso el alumno será capaz de comprender los principales métodos de análisis y diseño de los sistemas de control de tiempo continuo.

Objetivos del curso experimental

- El alumno comprobará el funcionamiento de los sistemas de control de lazo abierto y lazo cerrado.
- El alumno comprobará el comportamiento de los sistemas de lazo abierto y lazo cerrado para variaciones de los parámetros del sistema y perturbaciones externas.
- El alumno analizará el comportamiento de la estabilidad en los sistemas de control.
- El alumno aplicará diferentes controladores a un sistema para modificar su respuesta.
- El alumno observará las características de respuesta en el tiempo y respuesta en frecuencia de sistemas de control.

Introducción

En el laboratorio de Ingeniería de Control se analizará y comprobará el funcionamiento de las características de los sistemas de lazo abierto y los sistemas de lazo cerrado, considerando el modelo matemático y la función de transferencia que los representa, empleando para ello los diferentes métodos vistos en la materia de Ingeniería de Control como son: solución algebraica, diagramas de bloques, reogramas y software de simulación matemática.

En las primeras prácticas el alumno comprobará la respuesta de los sistemas de lazo abierto a las variaciones de los parámetros del sistema y las perturbaciones externas tales como: ruido, carga inercial, fricción viscosa y variaciones de ganancia, además analizará los sistemas de lazo cerrado y observará que estos sistemas son poco sensibles a los cambios externos o internos ya que la realimentación mejora su comportamiento y produce un sistema que se autocorrije.

En la práctica siguiente se obtendrán las funciones de transferencia de varios sistemas implementados con Amplificadores Operacionales (OpAmp) empleando los diversos métodos de análisis y se comprobará su funcionamiento práctico.

Con los OpAmp se pueden implementar diferentes configuraciones empleadas habitualmente en la creación de comparadores, integradores, derivadores, sumadores, diferenciales, amplificadores, inversores, etc., los cuales son utilizados en la construcción de controladores analógicos que permiten realizar la corrección de funcionamiento de muchos sistemas físicos.

En otra práctica se comprobará el funcionamiento de los sistemas de lazo cerrado y se verificará que el proceso de realimentación negativa mejora las características de respuesta, haciéndolo casi inmune a las variaciones de los parámetros, variaciones en la carga o perturbaciones externas. También se observará que la realimentación positiva puede llevar al sistema a un estado de oscilación, a la saturación e incluso a la inestabilidad y su posible destrucción.

Un punto importante es el análisis de la estabilidad absoluta, la cual determina si un sistema será útil o no, ya que si es inestable el sistema no controlará a la variable de salida y por lo tanto será inútil.

Otro de los elementos de interés es el análisis de la respuesta en el tiempo de sistemas de primer orden y de segundo orden, así como los parámetros típicos de respuesta tales como la constante de tiempo, el tiempo de respuesta, el tiempo de asentamiento, tiempo pico y el máximo sobreimpulso.

Las prácticas siguientes se orientan a la aplicación de controladores analógicos para poder visualizar como se compensa y sintoniza un controlador aplicado a un sistema físico:

- Control proporcional (P) aplicado a un sistema electromecánico.
- Control proporcional integral (PI) aplicado a un sistema electrónico.
- Control proporcional integral y derivativo (PID) aplicado a un sistema electrónico.

Estas prácticas se implementarán con amplificadores operacionales y sus configuraciones básicas vistas en las prácticas anteriores.

En la última práctica se obtiene la respuesta en frecuencia de un circuito y se determinan los diagramas de amplitud y fase de Bode.

Para la elaboración de estas prácticas se utilizará el Servomecanismo Modular MS150 que permite implementar sistemas de control con un motor de CD, también se implementarán circuitos electrónicos analógicos con amplificadores operacionales.

Los criterios de evaluación para el laboratorio son los siguientes:

N°	Criterio de evaluación	Porcentaje
C1	Actividades previas	40%
C2	Armado y funcionalidad de los circuitos	20%
C3	Interpretación correcta de las lecturas	10%
C4	Reporte entregado con todos los puntos indicados	30%

Instrucciones para la elaboración del reporte

Para la presentación del reporte se deberá cumplir con los requisitos indicados en cada una de las prácticas, incluyendo:

- Nombre de la práctica
- Objetivos
- Introducción complementaria (investigada por el alumno)
- Procedimiento experimental (gráficas, tablas, comentarios, etc.).
- Cuestionario
- Conclusiones
- Bibliografía y Cibergrafía

Los reportes deberán incluir una portada obligatoria de formato libre con la siguiente información, sin omitir ninguno de los datos.

U. N. A. M.
F. E. S. C.

Laboratorio de: _____

Grupo: _____ No. de Práctica: _____

Nombre de la Práctica: _____

Profesor: _____

Alumno: _____

Fecha de realización: _____ Fecha de entrega: _____

Semestre: _____

Bibliografía

1. Ogata Katsuhiko, (2010), *Ingeniería de Control Moderna*, Madrid: Pearson Educación: Prentice Hall: Quinta edición.
2. Hernández Gaviño, Ricardo, (2010), *Introducción a los sistemas de control: conceptos, aplicaciones y simulación con Matlab*: Naucalpan de Juárez, Estado de México: Pearson Educación de México: Prentice Hall.
3. Navarro Viadana, Rina M, (2004), *Ingeniería de Control: analógica y digital*: México: McGraw Hill Interamericana.
4. Chen, Chi-Tsong, (1993), *Analog and digital control system design: transfer-function, state-space, and algebraic methods*: New York : Oxford University Press.
5. Raven, Francis H., (1995): *Automatic control engineering*: New York: México: McGraw Hill.
6. Kuo, Benjamín C., (2003): *Automatic control systems*: Danvers: J. Wiley.
7. Dorf Richard C., (1998), *Modern Control Systems*: Mexico City: Addison Wesley Longman: Octava edición.
8. D'Azzo John J., Houpis Constantine H., (1988), *Linear Control System Analysis and Design: Conventional and Modern*: New York: McGraw Hill.

	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
	REGLAMENTO INTERNO DE LOS LABORATORIOS DE ELECTRÓNICA

El presente reglamento de la sección electrónica tiene por objetivo establecer los lineamientos para el uso y seguridad de laboratorios, condiciones de operación y evaluación, que deberán de conocer y aplicar, estudiantes y profesores en sus cuatro áreas: comunicaciones, control, sistemas analógicos y sistemas digitales.

1. Queda estrictamente prohibido, al interior de los laboratorios
 - a. Correr, jugar, gritar o hacer cualquier otra clase de desorden.
 - b. Dejar basura en las mesas de trabajo y/o pisos.
 - c. Fumar, consumir alimentos y/o bebidas.
 - d. Realizar o responder llamadas telefónicas y/o el envío de cualquier tipo de mensajería.
 - e. La presencia de personas ajenas en los horarios de laboratorio.
 - f. Dejar los bancos en desorden y/o sobre las mesas.
 - g. Mover equipos o quitar accesorios de una mesa de trabajo.
 - h. Usar o manipular el equipo sin la autorización del profesor.
 - i. Rayar y/o sentarse en las mesas del laboratorio.
 - j. Energizar algún circuito sin antes verificar que las conexiones sean las correctas (polaridad de las fuentes de voltaje, multímetros, etc.).
 - k. Hacer cambios en las conexiones o desconectar el equipo estando energizado.
 - l. Hacer trabajos pesados (taladrar, martillar, etc.) en las mesas de trabajo.
 - m. Instalar software y/o guardar información en los equipos de cómputo de los laboratorios.
 - n. El uso de cualquier aparato o dispositivo electrónico ajeno al propósito para la realización de la práctica.
 - o. Impartir sesiones teóricas, su uso es exclusivo para las sesiones de laboratorio.
2. Es responsabilidad del profesor y de los estudiantes revisar las condiciones del equipo e instalaciones del laboratorio al inicio de cada práctica (encendido, dañado, sin funcionar, maltratado, etc.). El profesor deberá generar el reporte de fallas de equipo o de cualquier anomalía y entregarlo al responsable de laboratorio o al jefe de sección.
3. Los profesores deberán de cumplir con las actividades y tiempos indicados en el “cronograma de actividades de laboratorio”.
4. Es requisito indispensable para la realización de las prácticas que el estudiante:
 - a. Descargue el manual completo y actualizado al semestre en curso, el cual podrá obtener en: http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria
 - b. Presente su circuito armado en la tableta de conexiones para poder realizar la práctica, de no ser así, tendrá una evaluación de cero en la sesión correspondiente.
 - c. Realice las actividades previas indicadas en el manual de prácticas para cada sesión de laboratorio.

5. La evaluación de cada sesión debe realizarse con base en los criterios de evaluación incluidos en los manuales de prácticas de laboratorio y no podrán ser modificados. En caso contrario, el estudiante deberá reportarlo al jefe de sección.
6. La evaluación final del estudiante en los laboratorios será con base en lo siguiente:
 - A - (Aprobado); Cuando el promedio total de todas las prácticas de laboratorio sea mayor o igual a 6 siempre y cuando tengan el 90% de asistencia, el 80% de prácticas acreditadas con base en los criterios de evaluación.**
 - NA - (No Aprobado); No cumplió con los requisitos mínimos establecidos en el punto anterior.**
 - NP - (No Presentó); Cuando no asistió a ninguna sesión de laboratorio.**
7. Profesores que requieran hacer uso de las instalaciones de laboratorio para realizar trabajos o proyectos, es requisito indispensable que notifiquen por escrito al jefe de sección. Siempre y cuando no interfiera con los horarios de los laboratorios.
8. Estudiantes que requieran realizar trabajos o proyectos en las instalaciones de los laboratorios, es requisito indispensable que esté presente el profesor responsable del trabajo o proyecto. En caso contrario no podrán hacer uso de las instalaciones.
9. Correo electrónico del buzón para quejas y sugerencias para cualquier asunto relacionado con los laboratorios (sgcc.electronica.cc@gmail.com).
10. A los usuarios que, por su negligencia o descuido inexcusable, cause daños al laboratorio, materiales o equipo deberá cubrir los gastos que se generen con motivo de la reparación o reposición.
11. El incumplimiento a estas disposiciones faculta al profesor para que instruya la salida del infractor y en caso de resistencia, la suspensión de la práctica.
12. Los usuarios de laboratorio que sean sorprendidos haciendo uso indebido de equipos, sustancias, materiales, instalaciones y demás implementos, serán sancionados conforme a la legislación universitaria que le corresponda, según la gravedad de la falta cometida.
13. Los casos no previstos en el presente reglamento serán resueltos por el Jefe de Sección.

“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”

Cuautitlán Izcalli, Estado de Méx. a 18 de junio de 2024

Laboratorio de Ingeniería de Control

Lista global de materiales

Cantidad	Materiales
1	Resistencia 330 k Ω a ½ W
5	Resistencias de 100 k Ω a ½ W
1	Resistencia de 82 k Ω a ½ W
2	Resistencias 47 k Ω a ½ W
2	Resistencias 33 k Ω a ½ W
10	Resistencias de 10 k Ω a ½ W
1	Resistencia de 8.2 k Ω a ½ W
2	Resistencias 4.7 k Ω a ½ W
1	Resistencia de 3.9 k Ω a ½ W
1	Resistencia de 1.2 k Ω a ½ W
1	Resistencia 1 k Ω a ½ W
1	Potenciómetro de 1 M Ω de precisión
2	Potenciómetros de 50 k Ω de precisión
3	Potenciómetros de 20 k Ω de precisión
1	Potenciómetro de 10 k Ω
1	Capacitores de 22 μ F
2	Capacitor de 0.1 μ F o 100 nF
2	Capacitores de 0.015 μ F o 15 nF
2	Capacitores 0.01 μ F o 10nF
2	Capacitores de 0.001 μ F o 1 nF
7	Amplificadores Operacionales LM741 o TL081

Laboratorio de Ingeniería de Control

Práctica 0 Introducción

OBJETIVOS

- El alumno conocerá el servomecanismo modular MS150 que se emplea en algunas de las prácticas del laboratorio de Ingeniería de Control.
- El alumno comprenderá la función de cada uno de los módulos que constituyen el servomecanismo modular MS150.

INTRODUCCIÓN

El sistema MS 150 es un servomecanismo modular que se emplea para realizar algunas prácticas del laboratorio de Ingeniería de Control, el cual ofrece la posibilidad de implementar diferentes tipos de controles sobre un motor de corriente directa, este sistema se muestra en la figura I.1.



Figura I.1 Servomecanismo modular MS150

En los siguientes párrafos se hará una breve descripción de los módulos que componen al servomecanismo modular MS150.

FUENTE DE ALIMENTACIÓN (PS150E)

El módulo mostrado en la figura I.2, provee las alimentaciones del voltaje necesarias para que funcione todo el sistema. Requiere una alimentación de 127 V y proporciona una señal de tierra y cuatro niveles de tensión:

- 18 V de corriente alterna.
- 18 V de corriente alterna con división de tap central.
- 15 V de corriente directa regulada
- -15 V de corriente directa regulada.
- 0 V Tierra común para las fuentes de corriente directa.

Este módulo está provisto de un circuito de protección contra sobrecargas, además contiene un amperímetro para indicar el consumo de corriente del motor.



Figura I.2 Fuente de alimentación PS150E

SERVOAMPLIFICADOR (SA150D)

La función de este módulo es la de proporcionar los puntos de conexión necesarios para controlar al motor de corriente directa, esto se realiza a través de un puente H, tal y como se observa en la figura I.3.

El servo amplificador tiene dos entradas para controlar el sentido de giro del motor, tales entradas solo se activan con voltaje positivo.

No requiere de alimentación externa puesto que la recibe directamente de la unidad PS 150 E a través de un conector que se localiza en la parte frontal. Esta unidad también consta de 3 conexiones de salida que proporcionan + 15 Vcd, 0V y -15 Vcd, que sirven para alimentar a otros módulos.



Figura I.3 Servoamplificador SA150D

UNIDAD ATENUADORA (AU150B)

Este módulo, mostrado en la figura I.4, está constituido por dos potenciómetros de 10K Ω , montados en un chasis. Son empleados como divisores de voltaje y por lo tanto como controladores de ganancia. Las terminales de color negro se utilizan como la referencia de tierra 0 V.



Figura I.4 Unidad Atenuadora AU150B

AMPLIFICADOR OPERACIONAL (OA150A)

El módulo mostrado en la figura I.5, contiene un amplificador operacional que es empleado en diferentes configuraciones: inversor, sumador, comparador, detector de error, diferencial e integrador, este dispositivo es un elemento esencial en los sistemas de lazo cerrado.

La función de transferencia del amplificador operacional en la configuración mostrada en este módulo es la siguiente:

$$\frac{Vs(s)}{Ve(s)} = - \frac{Zr}{Ze}$$

Donde “Zr” y “Ze” son las impedancias de realimentación y entrada respectivamente.

Generalmente esta unidad es empleada en una configuración de sumador a través de sus tres entradas en las terminales (1), (2) y (3) y la resistencia de realimentación de 100 K Ω definida con el selector de realimentación (feedback selector).



Figura I.5 Unidad de Amplificador Operacional OA150A.

Tiene la posibilidad de producir tres tipos de realimentación a través del selector.

- El primer modo de realimentación a través de una resistencia de $100\text{ K}\Omega$ lo que produce una ganancia unitaria negativa.
- El segundo modo es a través del paralelo entre una resistencia de $100\text{ K}\Omega$ y un capacitor de $10\text{ }\mu\text{F}$ para proporcionar una acción de control proporcional e integral inversora.
- El tercer modo permite colocar una realimentación externa a través de las terminales (4) y (5) con el objeto de modificar las características de funcionamiento del amplificador operacional y poder obtener ganancias variables o variaciones en la constante de tiempo.

Este módulo requiere de tres niveles de alimentación en sus terminales $+15\text{ V}$, -15 V y 0 V y cuenta además con una perilla para ajustar el offset de la salida.

Tiene dos salidas comunes en las terminales marcadas con (6).

MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA (DCM150F)

Es un motor que tiene dos devanados independientes alimentados por voltajes de corriente directa, un devanado corresponde al rotor o armadura y el otro al estator o campo. La figura 1.6 muestra este módulo.

Cada devanado se alimenta con corriente directa y por lo tanto se puede controlar de forma teórica de 2 formas:

- Control por Armadura – Voltaje en el devanado de armadura variable y voltaje de campo constante.
- Control por Campo – Voltaje en el devanado de armadura constante y voltaje de campo variable.

Este servomecanismo modular MS150 sólo puede ser controlado por armadura debido a las restricciones impuestas por el fabricante.

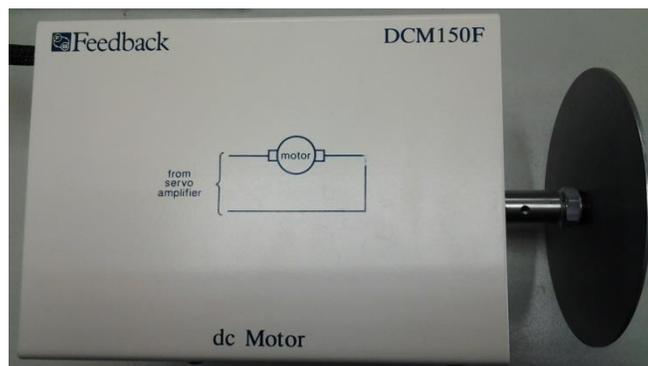


Figura 1.6 Motor de corriente directa

El motor cuenta con un eje en el cual pueden montarse diferentes discos que permiten simular carga de fricción viscosa o carga inercial.

Está conectado al módulo de servoamplificador en forma directa a través de un cable y por lo tanto no requiere de alimentaciones externas.

TREN DE ENGRANES REDUCTOR DE VELOCIDAD Y TACOGENERADOR (GT150X)

Este módulo, mostrado en la figura I.7 consta de dos ejes mecánicos perpendiculares entre sí; uno que se puede acoplar directamente con el eje del motor y el segundo eje proporciona una reducción de velocidad con una relación de 30 a 1 a través de un tren de engranes.

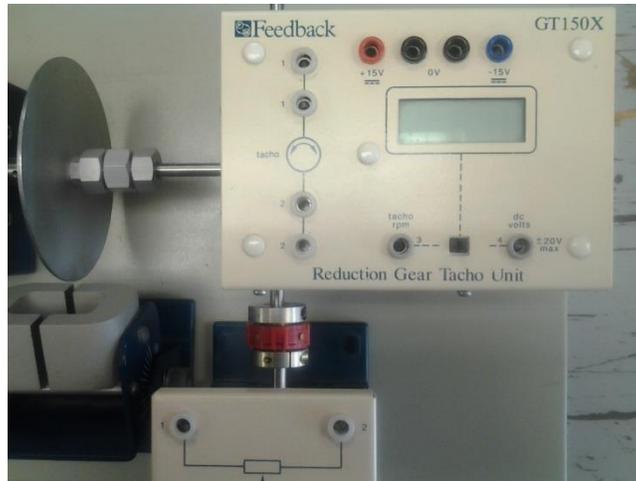


Figura I.7 Tren de engranes reductor de velocidad y tacogenerador GT150X.

Este módulo tiene un tacómetro integrado formado por un pequeño generador de voltaje de corriente directa que genera un voltaje directamente proporcional a la velocidad del motor con una relación:

$$K_g = 0.003 \text{ V/rpm.}$$

Las terminales de salida del tacogenerador están identificadas con los números (1) y (2), las cuales permiten obtener la salida de voltaje en la polaridad que necesitemos dependiendo de cuál de las terminales (1) ó (2) sea la que se conecte a tierra. Estas salidas están duplicadas para flexibilidad de conexión.

El módulo también consta de una pantalla LCD que permite visualizar las revoluciones por minuto (rpm) o el voltaje generado en volts, para ese efecto, se requiere seleccionar la función a través del switch e insertar la señal a medir en la entrada correspondiente (3) ó (4).

Este módulo requiere de tres niveles de alimentación externa en sus terminales + 15 V, - 15 V y 0 V.

POTENCIÓMETROS DE ENTRADA Y SALIDA (IP150H y OP150K)

Cada uno de estos módulos es un potenciómetro de alambre que está montado sobre un chasis, además consta de una carátula calibrada en grados.

Los dos potenciómetros son idénticos en cuanto a su funcionamiento puesto que entregan un voltaje de salida en su cursor proporcional a su posición angular, en donde el signo de la señal de voltaje de salida depende del sentido de giro y de las fuentes de alimentación utilizadas en los potenciómetros.

La diferencia entre el potenciómetro de entrada y de salida es que en el primero la perilla debe de ser girada en forma manual y en el segundo el giro del eje está controlado por la unidad GT150X a través del eje de salida del tren de engranes reductor de velocidad.

En la figura I.8 se muestra el potenciómetro de entrada en sus vistas superior y frontal y en la figura I.9 se muestra el potenciómetro de salida con sus respectivas vistas.



Figura I.8 Potenciómetro de entrada en vista superior y frontal.

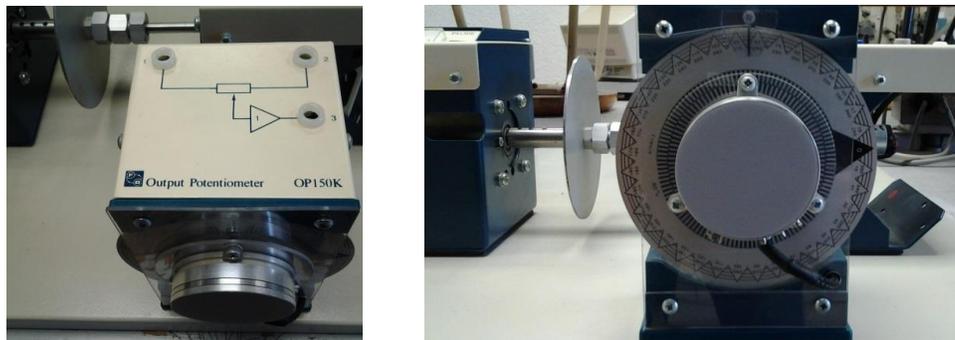


Figura I.9 Potenciómetro de salida en vista superior y frontal.

UNIDAD DE CARGA (LU150L)

Este módulo, mostrado en la figura I.10, se emplea para añadir fricción viscosa al motor y está compuesto por un disco de aluminio montado en el eje del motor, el cual se hace girar entre los dos imanes del freno magnético del módulo LU150L.



Figura I.10 Disco de aluminio y Freno magnético.

Al girar el disco entre los imanes se producen corrientes magnéticas de remolino (Eddy) que a su vez generan un campo magnético, el cual produce un par que se opone al movimiento del eje del motor. El área de interferencia polo / disco puede ajustarse con una escala de cero a diez para proporcionar al motor una carga viscosa variable.

PREAMPLIFICADOR (PA150C)

Esta unidad se emplea para activar de forma controlada el sentido de giro del motor generando una señal de voltaje en alguna de sus 2 terminales de salida (3) y (4), la decisión de cuál de las terminales de salida se activa depende de las señales de control de entrada, conexiones (1), (2) y (5) y así poder hacer que el motor gire en alguno de los 2 sentidos, la diferencia y el signo del voltaje entre las señales de entrada determina cual señal de salida se activa.

Además de realizar dicha función también sirve como un amplificador con ganancia aproximada de 25, requiere de alimentación externa.

En la figura I.11 se muestra el módulo de Pre-amplificador PA150C.



Figura I.11 Módulo de Pre-amplificador PA150C

Para emplear este módulo se requiere ajustar el offset de tal forma que la salida sea 0 Vcd cuando ambas entradas estén a 0 Vcd, si la salida difiere de 0 Vcd entonces hay que ajustar la perilla de Zero Offset.

La terminal (5) se emplea para insertar una corriente que se suma a las otras dos entradas de la unión y que es aproximadamente proporcional a la aceleración del motor en el rango de las bajas frecuencias, de tal forma que puede emplearse para simular una fricción viscosa o gran carga inercial.

Laboratorio de Ingeniería de Control

Práctica 1 Sistema de lazo abierto

TEMA

- 1.1. Definiciones básicas de sistemas de control.
- 1.2. Sistemas de control de lazo abierto y sistemas de control de lazo cerrado.

OBJETIVOS

- El alumno comprobará las características de los sistemas de lazo abierto a través de la implementación del control de velocidad de un motor de CD.
- El alumno obtendrá y analizará la gráfica de voltaje de alimentación contra velocidad angular.
- El alumno obtendrá y analizará la gráfica de carga de fricción viscosa aplicada al motor contra velocidad angular.

INTRODUCCIÓN

Muchos de los procesos empleados en la industria requieren de mecanismos que controlen la velocidad de giro de un motor o la posición de una carga acoplada a su eje. Dichos mecanismos se construyen con diferentes grados de complejidad de acuerdo con las necesidades del proceso tales como: costo, precisión, estabilidad, ancho de banda, sensibilidad, etc.

En esta práctica se armará un sistema de lazo abierto para obtener el control de la velocidad de un motor de CD, sabiendo que su velocidad puede regularse mediante la variación del voltaje de alimentación.

Un motor de corriente directa puede controlarse utilizando cualquiera de los siguientes métodos:

- **Control por armadura.** Variando el voltaje de alimentación en la armadura (VE) y manteniendo el voltaje de campo fijo (VF), lo cual produce un campo magnético constante.
- **Control por campo.** Variando el voltaje de alimentación al campo (VF) y manteniendo constante el voltaje de armadura (VE), lo cual mantiene la corriente de armadura constante.

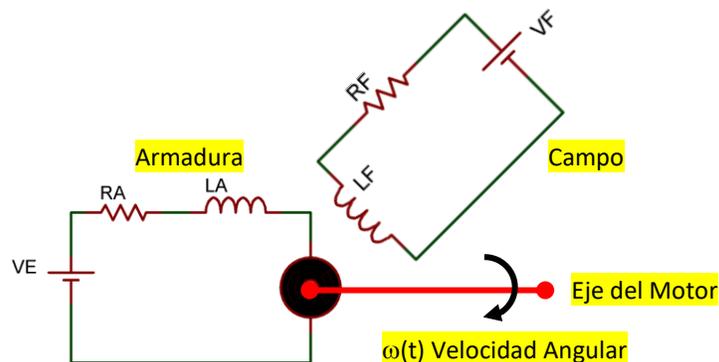
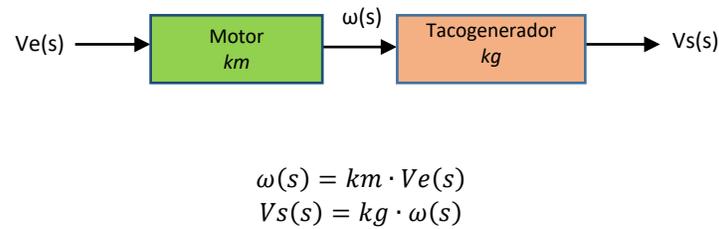


Figura 1.1 Devanados del Servomecanismo modular MS150.

El sistema se implementará empleando el servomecanismo modular MS150, este sistema sólo permite realizar el control por armadura.

En la figura 1.2 se muestra su correspondiente diagrama de bloques y las ecuaciones que relacionan a la entrada $V_e(s)$ voltaje de armadura con la salida $V_s(s)$ voltaje del tacogenerador. Estas ecuaciones solo son verdaderas en estado estable y no consideran la parte transitoria.

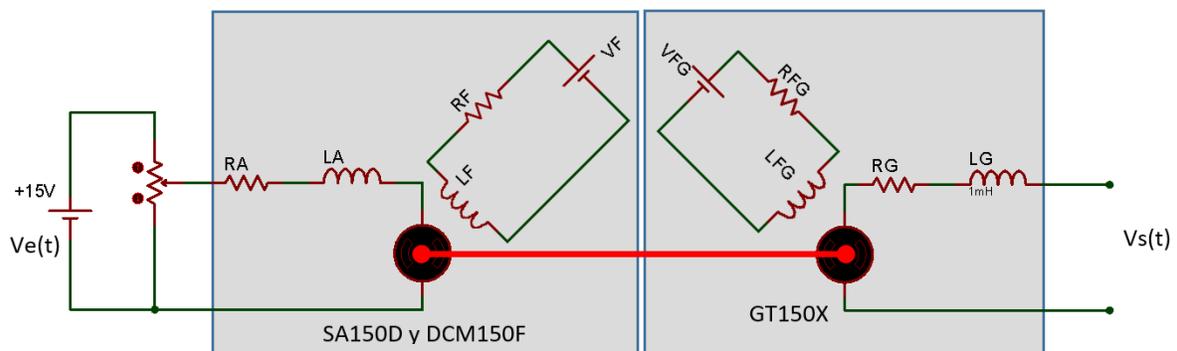


km = Ganancia del motor dependiente de los parámetros del sistema

$$kg = \text{Constante del tacogenerador} = 0.003 \frac{V}{rpm}$$

Figura 1.2. Diagrama de bloques del sistema de lazo abierto y ecuaciones

En la figura 1.3 se muestra el diagrama eléctrico del control de velocidad de lazo abierto en configuración de control por armadura.



$V_e(t)$ = Voltaje de entrada en la armadura
 $V_s(t)$ = Voltaje de salida del tacogenerador
 $K_g = 0.003 \text{ V/rpm}$.

Figura 1.3 Diagrama eléctrico

Los voltajes de campo del motor (VF) y del tacogenerador (VFG) son fijos y proporcionados por el sistema del servomecanismo por lo tanto no es posible acceder a ellos ni variarlos.

En esta configuración de lazo abierto, el voltaje de alimentación $V_e(s)$ es independiente de la velocidad de salida $\omega(s)$ y del voltaje generado $V_s(s)$, por lo cual tiene la desventaja de que, si se producen perturbaciones en la carga del motor, la velocidad de salida se desviará del valor inicial, la precisión del sistema dependerá del criterio y la estimación del usuario.

Hay que considerar que el tacogenerador sólo se emplea como un elemento de transducción para poder convertir la velocidad angular $\omega(s)$ en un voltaje directamente proporcional $V_s(s)$ a través de la ganancia constante kg , la cual se definió en la descripción de equipo de laboratorio de este manual.

La ganancia del motor km es un parámetro variable que depende de los parámetros del motor y las condiciones de trabajo; carga, perturbaciones, inercia, fricción, etc.

ACTIVIDADES PREVIAS

1. Realizar la lectura de la práctica de laboratorio.
2. Elaborar un resumen donde se expliquen las ventajas y desventajas de los sistemas de lazo abierto.
3. Obtener matemáticamente la función de transferencia $\frac{\omega(s)}{Ve(s)}$ de un servomotor de CD (Incluyendo todos sus parámetros).
4. Entregar al profesor en formato digital los puntos de las actividades previas que lo requieran, al inicio de la práctica.

EQUIPO

Fuente de alimentación	PS150E
Motor de corriente directa	DCM150F
Unidad atenuadora	AU150B
Unidad de carga	LU150L
Unidad tacogeneradora	GT150X
Servo amplificador	SA150D
Multímetro	
Osciloscopio	
Cables de conexión del Servomecanismo Modular MS150	

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

1. Conecte los módulos del servomecanismo como se muestran en la figura 1.5, el motor debe tener acoplado a su eje principal el disco de frenado, sin aplicar la unidad de carga LU150L. Asegúrese que los ejes de las unidades DCM150F y GT150X estén alineados como se muestra en la figura 1.4.



Figura 1.4 Alineación de ejes y disco de frenado.

2. Conecte el multímetro en el cursor del potenciómetro de entrada, terminal 2 del módulo AU150B y tierra, con este multímetro se medirá el voltaje de entrada $Ve(t)$.
3. Conecte el canal 1 del osciloscopio en cualquiera de las terminales de salida del tacogenerador, identificadas con el número 1, módulo GT150X y la terminal negativa del osciloscopio a tierra, con este canal se medirá el voltaje de salida $Vs(t)$.
4. Ajuste el canal 1 del osciloscopio para mediciones en acoplo de directa, ajuste la tierra y seleccione la medición de voltaje medio.
5. Coloque en cero la perilla del potenciómetro del voltaje de entrada $Ve(t)$, módulo AU150B.

- Asegúrese de que el interruptor del módulo del tacogenerador GT150X se encuentre en la posición *tacho rpm* y encienda la fuente de alimentación.

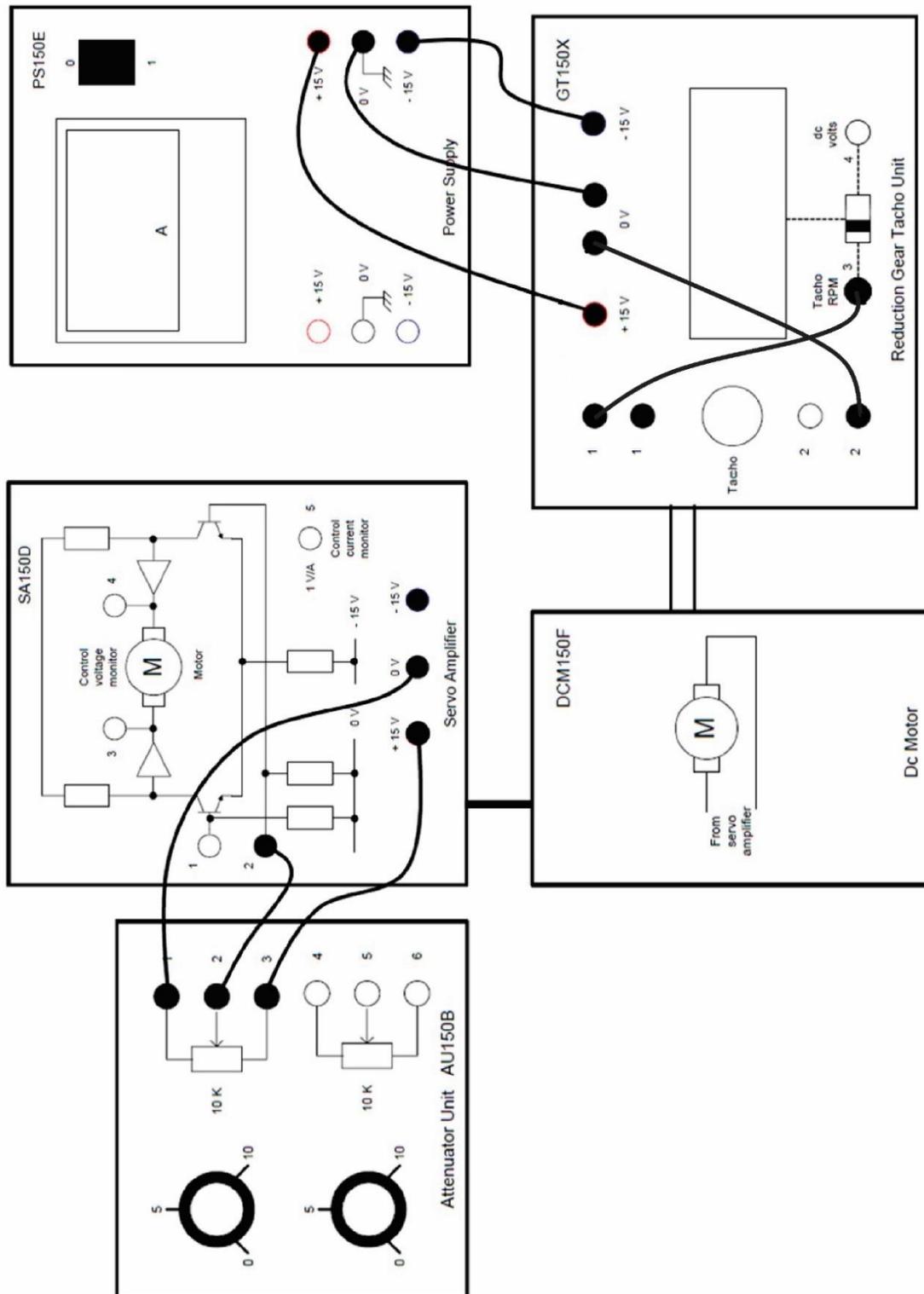


Figura 1.5 Diagrama de conexiones del sistema de lazo abierto.

7. Complete en la tabla 1.1 las columnas del voltaje de salida del taco generador $V_s(t)$ y la velocidad angular del motor $\omega(t)$, mostrada en el display del módulo GT150X, para incrementos de 0.5 V en el voltaje de entrada $V_e(t)$.

Voltaje de entrada $V_e(t)$ [V]	Voltaje de salida $V_s(t)$ [V]	Velocidad Angular $\omega(t)$ [rpm]
0.0		
0.5		
1.0		
1.5		
2.0		
2.5		
3.0		
3.5		
4.0		
4.5		
5.0		

Tabla 1.1

8. Apague la fuente de alimentación.
 9. Acople la unidad de carga LU150L al disco de frenado del motor y ponga el freno magnético en la posición cero.
 10. Encienda el sistema y varíe el potenciómetro de entrada $V_e(t)$ hasta que el voltaje en su cursor sea 3 V, este valor es para obtener una velocidad de referencia inicial a la salida del motor, el cual permanecerá constante durante todo el procedimiento de medición para la tabla 1.2.
 11. Registre en la tabla 1.2 las variaciones que se producen en el voltaje de salida $V_s(t)$, en la velocidad angular $\omega(t)$ y en la corriente $I_s(t)$ para cada posición del freno magnético.

Posición del freno	Voltaje de salida $V_s(t)$ [V]	Velocidad Angular $\omega(t)$ [rpm]	Corriente del motor $I_s(t)$ [A]
0			
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

Tabla 1.2

12. Apague la fuente de alimentación, desconecte los módulos y guarde los cables.

CUESTIONARIO

1. Empleando los datos de la tabla 1.1, dibuje la gráfica de voltaje de alimentación V_e (eje x), contra la velocidad angular ω (eje y). Anote sus comentarios acerca del comportamiento de la velocidad angular ω con respecto al voltaje de entrada V_e .
2. Obtenga la ecuación del comportamiento de la velocidad angular en la zona lineal de la gráfica anterior, sin considerar la zona de saturación, parte de la salida que se mantiene casi constante aún para variaciones de la entrada, esto se puede obtener con la aplicación de Excel.
3. Obtenga la función de transferencia $\frac{V_s(s)}{V_e(s)}$ de las ecuaciones de la figura 1.2 y calcule la ganancia K_m del motor para los puntos de la tabla 1.1, únicamente en la zona lineal de la gráfica.
4. De los datos de la tabla 1.2, dibuje en una sola gráfica, como la mostrada en la figura 1.6, la posición del freno, eje x, contra la velocidad angular ω y la corriente I_s en el eje y. Anote sus comentarios acerca del comportamiento de la velocidad angular y la corriente con respecto a la posición del freno. **Considere que cada uno de los ejes verticales debe tener una escala diferente.**

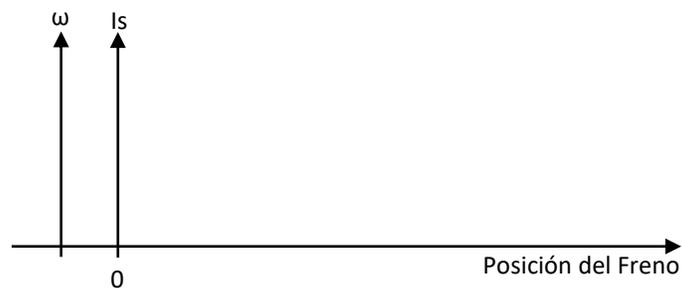


Figura 1.6 Gráfica de Posición del Freno contra velocidad angular y corriente

5. Calcule la ganancia k_m del motor para los puntos de la tabla 1.2 utilizando la función de transferencia de la figura 1.2. Comente acerca de las variaciones producidas por la inclusión del freno magnético.
6. Obtenga el rango de variación de la velocidad angular (diferencia entre el valor mayor y el menor) de la tabla 1.2 y comente acerca de los valores obtenidos.
7. En qué forma afecta el freno magnético (perturbación externa) a la velocidad angular del motor.

Laboratorio de Ingeniería de Control

Práctica 2 Sistema de lazo cerrado

TEMA

- 1.1. Definiciones básicas de sistemas de control.
- 1.2. Sistemas de control de lazo abierto y sistemas de control de lazo cerrado.

OBJETIVOS

- El alumno comprobará las características de funcionamiento de un sistema de lazo cerrado.
- El alumno observará las diferencias existentes entre realimentación negativa y positiva.
- El alumno analizará los efectos producidos en un sistema de lazo cerrado al insertar una perturbación externa.
- El alumno comprobará las diferencias con los sistemas de lazo abierto.

INTRODUCCIÓN

Para reducir las variaciones de la salida al introducir perturbaciones externas en un sistema de control de lazo abierto como el que se muestra en la figura 2.1, se utiliza un arreglo específico denominado sistema de lazo cerrado o sistema de control realimentado como el que se muestra en la figura 2.2.



Figura 2.1 Sistema de lazo abierto.

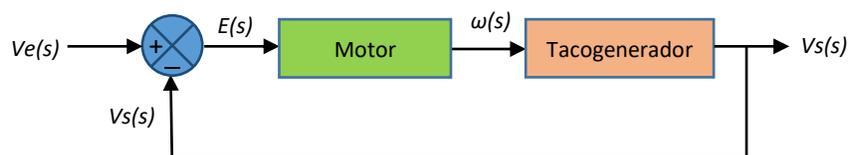


Figura 2.2 Sistema de lazo cerrado.

En la figura 2.2 se puede observar que ahora el voltaje de alimentación $V_e(s)$ no activa directamente al motor como en el sistema de lazo abierto, sino que es insertado en un dispositivo comparador que evalúa la diferencia entre la señal de referencia o voltaje de entrada $V_e(s)$ y la señal de realimentación del tacogenerador o $V_s(s)$, la diferencia de ambas produce la señal de error $E(s)$.

$$E(s) = V_e(s) - V_s(s) \quad \dots (1)$$

Para la implementación física del comparador se utilizará el amplificador operacional de la unidad OA150A en la configuración de sumador inversor, por lo tanto, para poder evaluar la ecuación de error anterior, se deberá considerar la ganancia $k = -1$ del amplificador y forzar a que la señal de entrada $V_e(s)$ sea un voltaje negativo y la realimentación $V_s(s)$ una señal con signo positivo tal y como se muestra en la figura 2.3.

La adición del amplificador operacional modifica las ecuaciones del sistema de tal manera que ahora la planta se alimenta con la señal de error actuante $M(s)$ en lugar de la señal de error $E(s)$. Las ecuaciones resultantes se presentan a continuación:

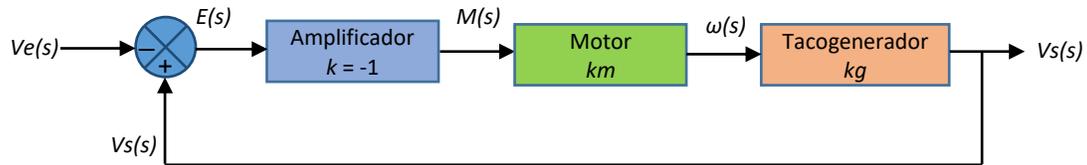


Figura 2.3 Sistema de lazo cerrado con amplificador operacional.

$$E(s) = [-Ve(s) + Vs(s)] \quad \dots (2)$$

$$M(s) = k * E(s) = -1 * [-Ve(s) + Vs(s)] \quad \dots (3)$$

$$M(s) = Ve(s) - Vs(s) \quad \dots (4)$$

La señal de error actuante $M(s)$ es la que controla al motor y genera la velocidad angular $\omega(s)$ a partir de la ecuación:

$$\omega(s) = km * M(s) \quad \dots(5)$$

La señal de salida $Vs(s)$ se obtiene a través del tacogenerador, el cual produce un voltaje de salida que es directamente proporcional a la velocidad angular del motor:

$$Vs(s) = kg * \omega(s) \quad \dots(6)$$

Un punto importante en el desarrollo de esta práctica es la polaridad de las señales de referencia y de realimentación, ya que se requiere tener realimentación negativa para que el sistema funcione adecuadamente.

La realimentación negativa se obtiene cuando los signos de las señales de entrada al comparador tienen signos opuestos, lo cual significa que, si la velocidad de salida se reduce debido a un aumento en la carga, entonces se produce un incremento en la señal de error para tratar de mantener una velocidad constante a la salida del motor.

En la figura 2.4 se muestra el diagrama eléctrico del sistema de control de velocidad de lazo cerrado en configuración de control por armadura.

ACTIVIDADES PREVIAS A LA PRÁCTICA

1. Realizar la lectura de la práctica de laboratorio.
2. Investigar y hacer un resumen de las características y la función de transferencia de un amplificador operacional en configuración de sumador inversor.
3. Obtener las funciones de transferencia $\frac{\omega(s)}{Ve(s)}$ y $\frac{Vs(s)}{Ve(s)}$, considerando el diagrama de bloques de la figura 2.3 y las ecuaciones 2 a 6 del desarrollo, observe que el signo de la señal $Ve(s)$ ya está incluido en las ecuaciones. Obtenga las funciones de transferencia en función del parámetro de ganancia del motor (km)
4. Entregar al profesor al inicio de la práctica en formato digital los puntos de las actividades previas que lo requieran.

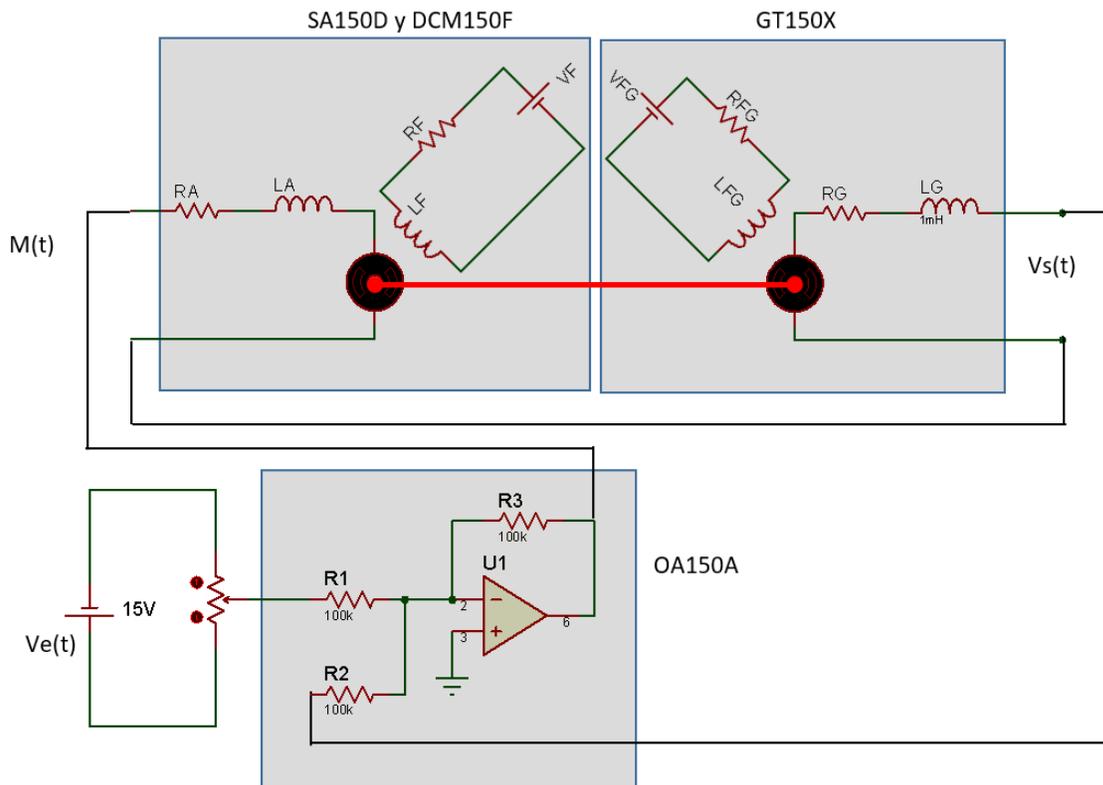


Figura 2.4 Diagrama eléctrico del sistema de lazo cerrado.

EQUIPO

Fuente de alimentación	PS150E
Motor de CD	DCM150F
Servo amplificador	SA150D
Unidad de amplificador operacional	OA150A
Unidad atenuadora	AU150B
Unidad de carga	LU150L
Unidad tacogeneradora	GT150X
Multímetro	
Osciloscopio	
Cables de conexión del Servomecanismo Modular M150	

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

1. Conecte las unidades como se muestra en la figura 2.5.
2. Seleccione una ganancia unitaria ($K = -1$) para el amplificador operacional del módulo OA150A girando la perilla selectora hasta el extremo izquierdo para conectar la resistencia de 100 kΩ.
3. Desconecte las terminales de entrada 2 y 3 del amplificador operacional.
4. Conecte las terminales 2 y 3 a tierra de forma temporal para realizar el procedimiento de calibración del módulo.
5. Sin el freno magnético, alimente el sistema y mida el voltaje de salida en la terminal 6 del amplificador OA150A, mueva la perilla marcada como Zero Set hasta obtener en la salida un voltaje lo más cercano

- posible a 0 V comprobando que el motor esté detenido (mantenga la posición de la perilla antes mencionada durante todo el proceso de la práctica).
- Restituya las conexiones de las terminales 2 y 3 de acuerdo con el diagrama de la figura 2.5.
 - Ponga el freno magnético en la posición cero, encienda el sistema y gire el potenciómetro de entrada hasta que el voltaje en su cursor sea $V_e(t) = -3$ V, esto con objeto de fijar una velocidad de referencia a la salida del sistema.
 - Registre en la tabla 2.1 el voltaje de error actuante $M(t)$, el voltaje de salida $V_s(t)$, la velocidad angular $\omega(t)$ y la corriente $I_s(t)$ para las diferentes posiciones del freno magnético.

Posición del freno	Error Actuante $M(t)$ [V]	Voltaje de Salida $V_s(t)$ [V]	Velocidad Angular $\omega(t)$ [rpm]	Corriente $I_s(t)$ [A]
0				
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Tabla 2.1

- Apague el sistema.
- Regrese el freno a la posición 0 e invierta las conexiones 1 y 2 del módulo GT150X para obtener realimentación positiva y encienda el sistema.
- Observe y anote sus comentarios acerca del comportamiento de la velocidad en comparación con la velocidad de referencia fijada en el inciso 7 y apague el sistema.

CUESTIONARIO

- De los datos de la tabla 2.1, dibuje en una sola gráfica, como la mostrada en la figura 2.6, la posición del freno, en el eje x, contra la velocidad angular $\omega(t)$ y el error actuante $m(t)$ en el eje y. **Considere que cada uno de los ejes verticales tiene una escala diferente.**

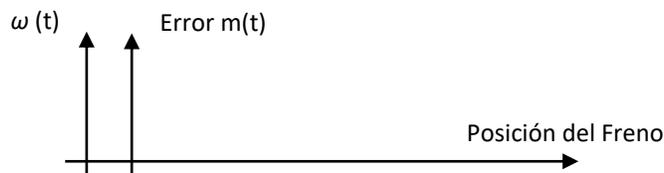


Figura 2.6 Gráfica de Posición del Freno contra velocidad angular $\omega(t)$ y error actuante $m(t)$

- Explique las diferencias observadas entre el control de velocidad de lazo abierto y el actual de lazo cerrado.
- Compruebe matemáticamente para todos los datos de la tabla 2.1, que la señal de error actuante $m(t)$ sea la diferencia entre la entrada $V_e(t)$ y la realimentación $V_s(t)$. Considere los valores absolutos de $V_e(t)$ y $V_s(t)$.
- Obtenga el rango de variación de la velocidad angular (diferencia entre el valor mayor y el menor) de la tabla 2.1, compare dicho rango con el obtenido en la práctica anterior de lazo abierto y comente.

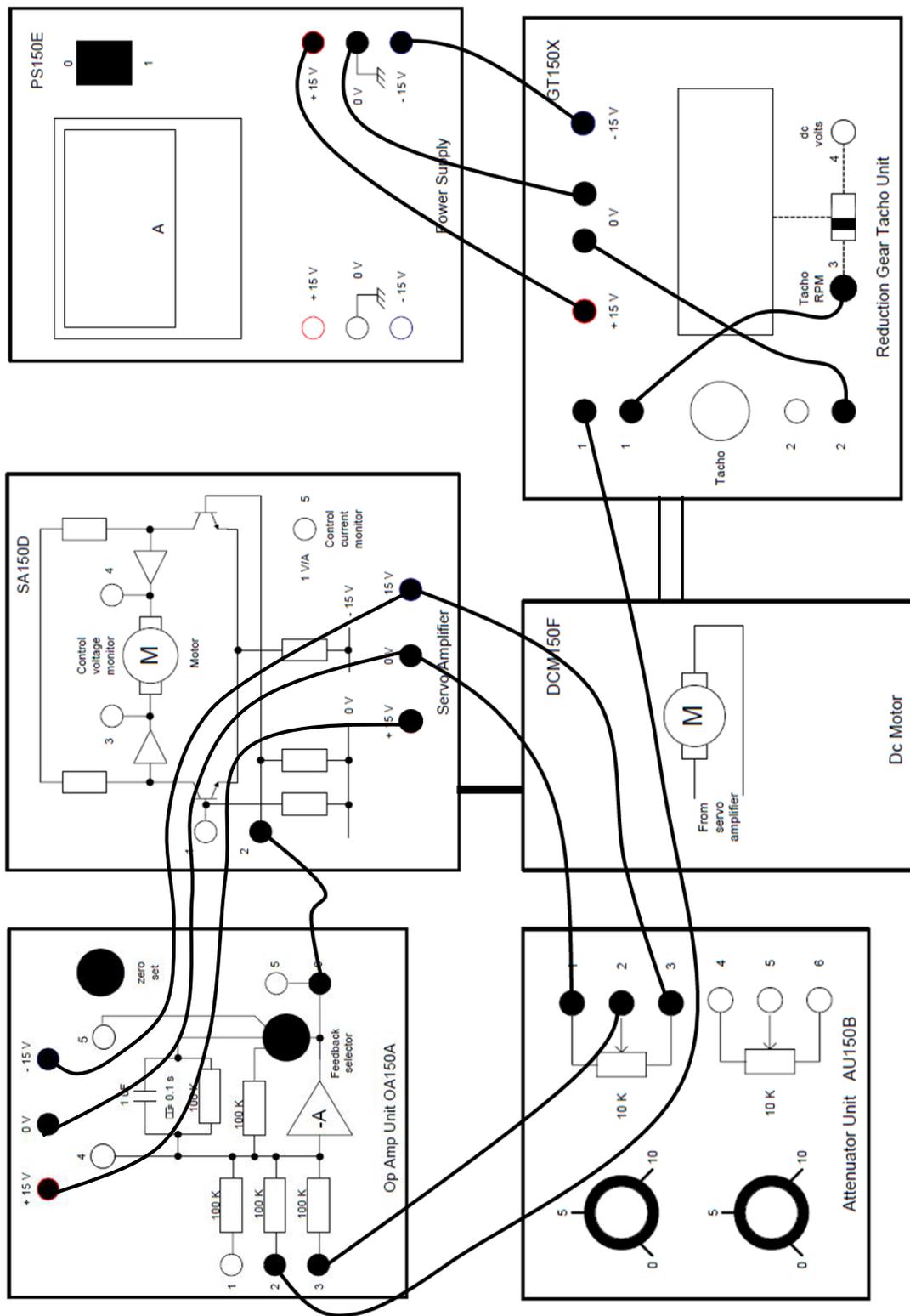


Figura 2.5 Sistema de Lazo cerrado

Laboratorio de Ingeniería de Control

Práctica 3 Modelado de sistemas con amplificadores operacionales

TEMA

- 1.3. Representación de sistemas mediante diagramas de bloques.
- 1.4. Representación de sistemas mediante reogramas.

OBJETIVOS

- El alumno obtendrá la función de transferencia de circuitos con amplificadores operacionales empleando el método de diagramas de bloques o de reogramas.
- El alumno comprobará los resultados teóricos con la implementación y prueba de diferentes configuraciones de circuitos con amplificadores operacionales.

INTRODUCCIÓN

La función de cualquier amplificador es incrementar la magnitud de una señal sin que esta sea distorsionada.

Los amplificadores operacionales (OpAmp) son dispositivos electrónicos que amplifican señales de voltaje, la denominación de operacionales es porque pueden realizar muchas operaciones diferentes sobre las señales de entrada tales como: sumar, integrar, derivar, invertir, comparar, etc.

Los amplificadores operacionales son muy empleados en la simulación analógica de procesos de todo tipo; eléctricos, mecánicos, hidráulicos, neumáticos, térmicos e incluso sociales, siempre y cuando el modelo matemático de tales procesos se presente a través de ecuaciones integro diferenciales.

Los amplificadores operacionales tienen características muy cercanas a las características ideales de un amplificador y debido a esta condición, se puede simplificar el análisis de los circuitos que los contienen.

Básicamente estas características son:

- Alta ganancia de voltaje $A_v = \infty$.
- Impedancia de entrada infinita $Z_i = \infty$.
- Impedancia de salida cero $Z_o = 0$.
- Ancho de banda grande $BW = \infty$.
- Cuando la diferencia de voltaje en sus entradas es cero la salida es igual a cero.

Existe un número muy grande de configuraciones de circuitos implementados con amplificadores operacionales, pero entre las más utilizadas está la del amplificador inversor mostrada en la figura 3.1.

Este circuito se implementa con una impedancia de entrada (Z_1) y una impedancia de realimentación (Z_2), las cuales determinan la función de transferencia del circuito.

$$\frac{V_s(s)}{V_e(s)} = -\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)$$

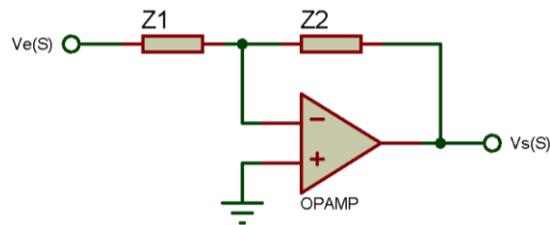


Figura 3.1 Configuración de amplificador inversor básico

Este tipo de amplificadores se fabrica en un componente denominado “circuito integrado”, entre los más comunes se encuentran el LM741, LM747, TL081 y muchos otros.

Para que el circuito LM741 o TL081 funcione se requiere alimentarlo con 2 voltajes de corriente directa, uno positivo y uno negativo, por lo que es necesario contar con una fuente bipolar o en su defecto con dos fuentes de voltaje. Observe en la figura 3.2 que una fuente bipolar se implementa con dos fuentes de voltaje conectadas en serie y lo que define el voltaje positivo y el voltaje negativo es la posición de las terminales con respecto a la tierra, la cual se toma del punto intermedio entre las 2 fuentes de voltaje.

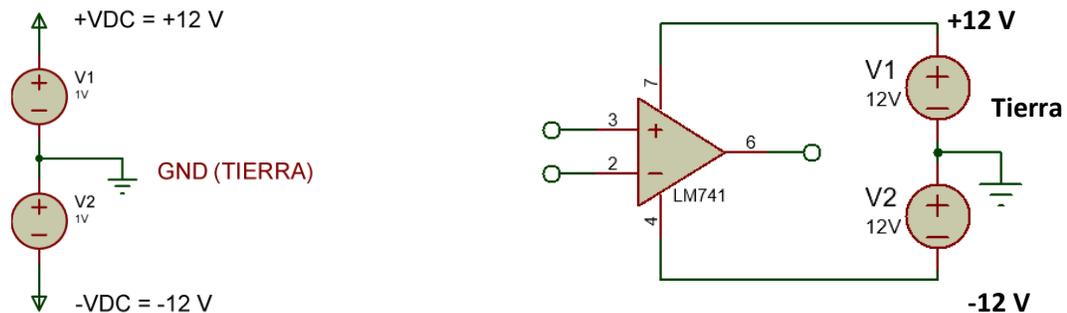


Figura 3.2 Fuente bipolar y alimentación del circuito LM741 o TL081 con dos fuentes de voltaje.

El amplificador operacional LM741 o TL081 de 8 terminales viene integrado en un encapsulado como se puede observar en su hoja técnica.

En esta práctica el alumno podrá comprobar el funcionamiento de algunas configuraciones básicas implementadas con amplificadores operacionales tales como: inversor, amplificador, integrador, derivador y sumador y comprobar que el modelo matemático representado en Laplace describe de forma adecuada el comportamiento del sistema.

ACTIVIDADES PREVIAS A LA PRÁCTICA

1. Realizar la lectura de la práctica de laboratorio.
2. Descargar en formato electrónico la hoja técnica del circuito integrado LM741 o TL081.
3. Obtener la ganancia teórica de los circuitos 3.3, 3.4 y 3.5.
4. Obtener las funciones de transferencia en Laplace empleando diagramas de bloques o reogramas, para los circuitos 3.6 y 3.7, calcule la ganancia para la frecuencia especificada en el procedimiento experimental.
5. Realice las simulaciones de los circuitos 3.3, 3.4 y 3.5, para los circuitos 3.6 y 3.7 solo para señal senoidal.
6. Entregar al profesor en formato impreso o digital los puntos de las actividades previas que lo requieran al inicio de la práctica.

MATERIAL

- 5 Resistencias de 100 kΩ a ½ W
- 1 Resistencia de 82 kΩ a ½ W
- 2 Resistencias de 10 kΩ a ½ W.
- 1 Capacitor de 0.1 μF
- 1 Capacitor de 0.01μF
- 1 Circuito integrado LM741 o TL081
- 1 Tableta de conexiones
- Alambres para conexiones

EQUIPO

- 1 Fuente bipolar de C.D. ó 2 fuentes de C.D.
- 1 Generador de funciones
- 1 Osciloscopio
- 1 Multímetro

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

1. Arme el circuito de la figura 3.3 utilizando como base la hoja de datos técnica.

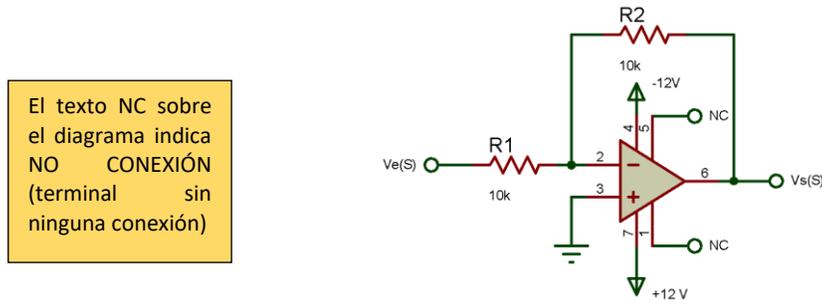


Figura 3.3

2. Conecte las fuentes de voltaje de C.D. de acuerdo con las indicaciones mostradas en la figura 3.2 y ajuste su valor a +12V y a -12V respectivamente.
3. Ajuste el generador de funciones con una señal senoidal $V_e(t) = 0.8 \text{ Sen } 6283.2 t$ [V].
4. Observe las señales $V_e(t)$ en el canal 1 y la señal $V_s(t)$ en el canal 2 del osciloscopio, compare y anote sus observaciones con respecto a la amplitud, fase y función realizada.
5. Dibuje ambas señales indicando los voltajes pico a pico y el valor del periodo.
6. Cambie la resistencia de realimentación R2 para obtener el circuito de la figura 3.4 y repita los incisos 4 y 5 para la misma señal de entrada $V_e(t)$ del inciso 3.

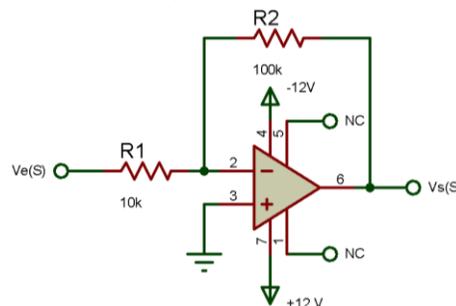


Figura 3.4

- Arme el circuito de la figura 3.5 y ajuste el generador de funciones para obtener una señal senoidal $V_e(t) = 5 \text{ Sen } 6283.2 t \text{ [V]}$.

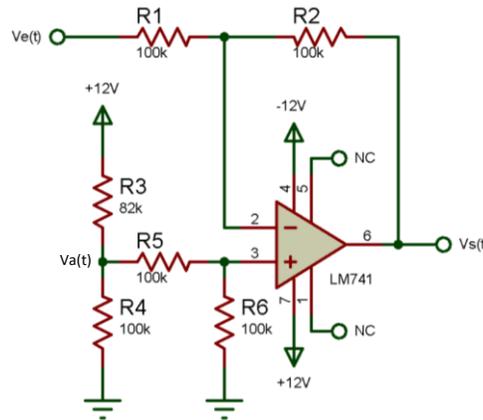


Figura 3.5

- Mida y grafique las señales de los puntos $V_e(t)$, $V_a(t)$ y $V_s(t)$ indicando los voltajes correspondientes. Cada canal del osciloscopio debe estar en acoplo de directa y las tierras del osciloscopio ajustadas de forma correcta con el objeto de visualizar la componente de corriente directa que contiene la señal de salida. Compruebe la correcta operación del circuito en función de la ecuación que describe a la señal de salida calculada en las actividades previas.
- Arme el circuito de la figura 3.6.

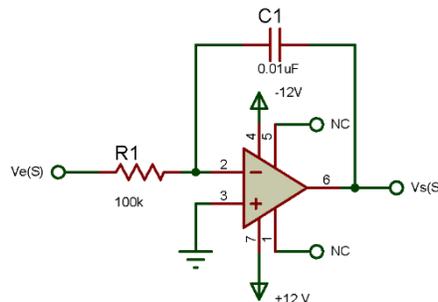


Figura 3.6

- Cambie cada canal del osciloscopio a acoplo de alterna.
- Con una señal $V_e(t)$ de amplitud pico de 1 V y un periodo $T = 10 \text{ ms}$, dibuje las señales de entrada $V_e(t)$ y de salida $V_s(t)$ correspondientes a cada uno de los tres tipos de señales que puede producir el generador de funciones (senoidal, triangular y cuadrada). Verificar para cada señal de entrada que el periodo sea $T = 10 \text{ ms}$ y la amplitud sea de 1V pico.
- Regrese la entrada $V_e(t)$ a la señal senoidal del punto 11 e incremente y decremente la frecuencia del generador de funciones, comente acerca de las variaciones que presenta la salida con respecto a la amplitud, fase, forma, distorsión, etc.
- Arme el circuito de la figura 3.7
- Con una señal $V_e(t)$ de amplitud pico de 1 V y un periodo $T = 10 \text{ ms}$, dibuje las señales de entrada $V_e(t)$ y de salida $V_s(t)$ correspondientes a cada uno de los tres tipos de señales que puede producir el generador de funciones (senoidal, triangular y cuadrada). Verificar para cada señal de entrada que el periodo sea $T = 10 \text{ ms}$ y la amplitud sea de 1V pico.

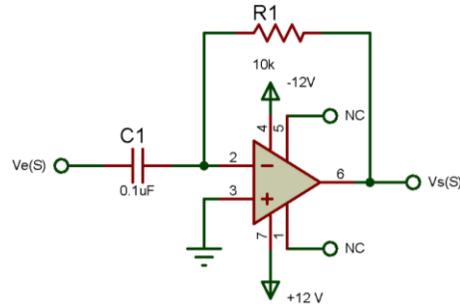


Figura 3.7

15. Regrese la entrada $V_e(t)$ a la señal senoidal del punto 14 e incremente y decremente la frecuencia del generador de funciones, comente acerca de las variaciones que presenta la salida con respecto a la amplitud, fase, forma, distorsión, etc.

CUESTIONARIO

1. Haga una tabla comparativa de los valores de ganancia teóricos obtenidos en las actividades previas y los valores obtenidos en el laboratorio y comente acerca de las diferencias que se presenten.
2. Obtenga la ecuación de salida $V_s(t)$ teórica de los circuitos 3.6 y 3.7 empleando las funciones de transferencia obtenidas y gráfíquelas (considerando la entrada senoidal descrita en el desarrollo). Describa la operación matemática que hace cada uno de ellos.
3. De acuerdo con los resultados obtenidos en la práctica, ¿considera que la función de transferencia representa de manera adecuada al funcionamiento del circuito?, justifique su respuesta.

Laboratorio de Ingeniería de Control

Práctica 4 Estabilidad

TEMA

2.1. Concepto de Estabilidad.

OBJETIVOS

- El alumno observará el concepto de estabilidad de un sistema físico implementado con amplificadores operacionales.
- El alumno obtendrá la función de transferencia empleando diagramas de bloques o reogramas.
- El alumno relacionará la estabilidad del sistema en función de los valores de sus componentes.

INTRODUCCIÓN

En la figura 4.1 se muestra el diagrama a bloques de un sistema de lazo cerrado en donde la salida $C(s)$ es realimentada al comparador cuya función es calcular el error a través de un bloque de realimentación para compararse con la entrada de referencia $R(s)$.

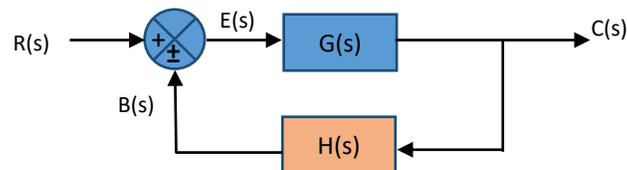


Figura 4.1

A partir del cual se calcula su función de transferencia de lazo cerrado:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 \mp G(s)H(s)}$$

Donde el término del denominador $1 \mp G(s)H(s) = 0$ representa a la ecuación característica del sistema, la cual define los polos del sistema y estos a su vez establecen la forma de respuesta en el tiempo de cada una de las fracciones parciales que componen a la función de transferencia.

Cada una de las raíces de esta ecuación característica representa un término de respuesta en el tiempo y haciendo un análisis sobre dichas raíces se puede identificar la estabilidad del sistema con tan solo posicionar estas raíces sobre el plano complejo de Laplace.

En el concepto de estabilidad se establece que:

- Si todos los polos de una ecuación característica tienen parte real negativa, entonces el sistema será **estable**.
- Si uno de los polos de una ecuación característica tiene parte real positiva, entonces el sistema será **inestable**.

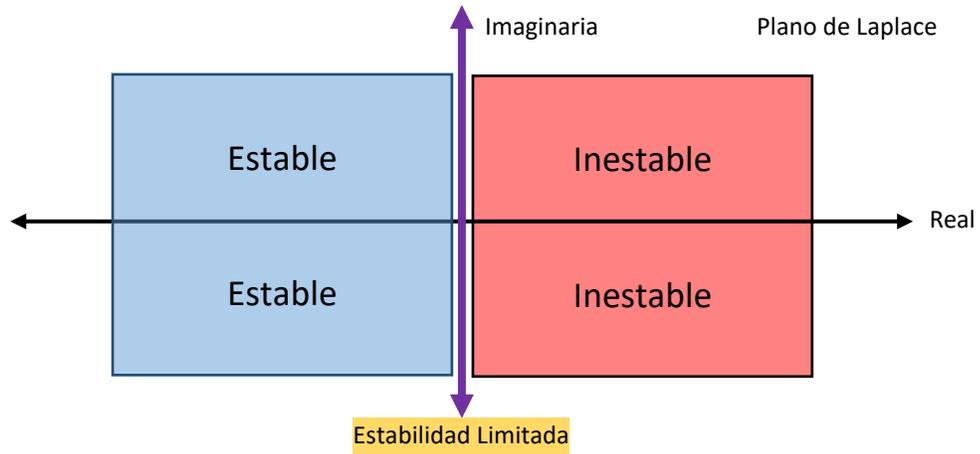


Figura 4.2

Este concepto matemático también puede observarse de forma práctica ya que se considera que:

- Un sistema es **estable** si para una **entrada acotada** se produce una **salida acotada**, figura 4.3.
- Un sistema será **inestable** si para una **entrada acotada** se produce una **salida no acotada**, figura 4.4.

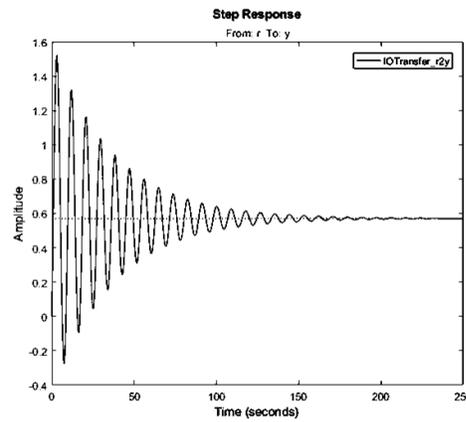
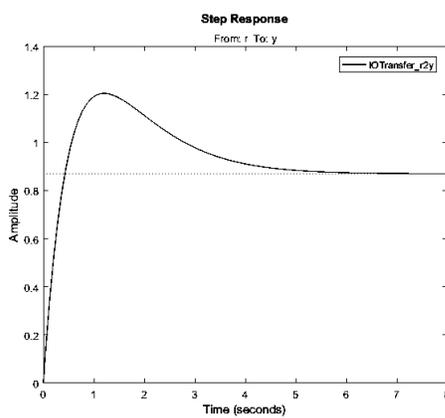


Figura 4.3 Salidas estables (acotadas) para entrada escalón unitario (acotada).

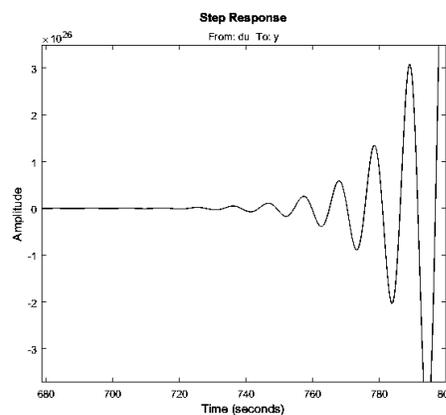
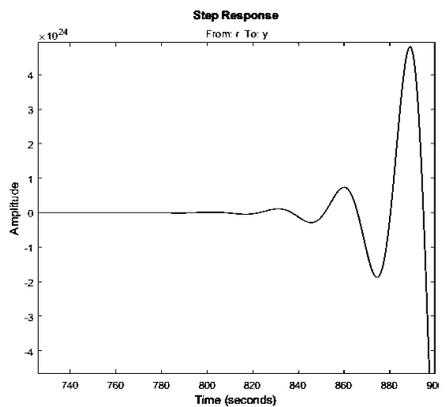


Figura 4.4 Salidas inestables (no acotadas) para entrada escalón unitario (acotada)

Por lo tanto, si la salida en el tiempo de nuestro sistema crece de forma indefinida, entonces el sistema será inestable.

En el circuito de la práctica este proceso de crecimiento al infinito no puede obtenerse debido a que los amplificadores operacionales tienen límites de operación definidos por sus fuentes de alimentación y por lo tanto la salida se satura al voltaje máximo de alimentación del amplificador operacional.

Se observará además que modificando los parámetros del sistema se obtendrá una ecuación característica cuyos coeficientes cambian en función del valor de dicho elemento, en este caso un potenciómetro.

Para la realización de esta práctica es muy importante la correcta calibración y medición del potenciómetro.

En las figuras 4.5a y 4.5b se muestran 2 ejemplos de medición de parámetros de un potenciómetro de $50\text{ K}\Omega$ para 2 casos específicos de conexión:

- Cuando el potenciómetro tiene libres sus 3 terminales, 2 extremos y el cursor, figura 4.5a.
- Cuando el potenciómetro tiene conectado el cursor a una de las terminales de los extremos, figura 4.5b.

En el primer caso, figura 4.5a, la posición del cursor se encuentra en la mitad del potenciómetro y por lo tanto si medimos desde cualquiera de sus extremos con respecto al cursor la medición será de $25\text{ K}\Omega$, la variación de la posición del cursor provocará que la resistencia de un lado se reduzca y del otro lado se incremente y la suma de ambos valores siempre será de $50\text{ K}\Omega$.

En el segundo caso, figura 4.5b, el cursor está conectado a uno de los extremos del potenciómetro y su posición está en la parte central del potenciómetro, en esta conexión la resistencia asociada del lado izquierdo está en paralelo con un alambre y por lo tanto su valor equivalente es de $0\ \Omega$ o un alambre y por lo tanto el valor medido entre las terminales de los extremos solo es $25\text{ K}\Omega$, es por ello que con esta conexión se tiene una resistencia variable desde $50\text{ K}\Omega$, cursor en el extremo izquierdo del dibujo, hasta una resistencia nula de $0\ \Omega$ con el cursor en el extremo derecho del dibujo.

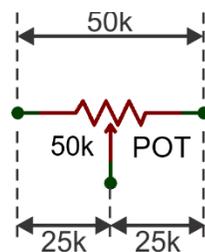


Figura 4.5a

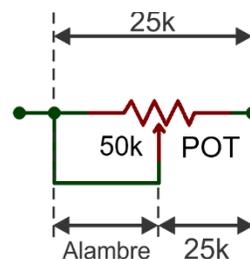


Figura 4.5b

ACTIVIDADES PREVIAS A LA PRÁCTICA

1. Realizar la lectura de la práctica de laboratorio.
2. Obtener la función de transferencia del circuito mostrado en la figura 4.6 considerando que la resistencia del potenciómetro (P) es variable, empleando diagramas de bloques o reogramas (incluir todo el desarrollo) y entregar la solución a su profesor al iniciar la práctica..
3. Obtener la ecuación característica y calcular el rango de P para estabilidad empleando el criterio de Routh, incluya el desarrollo.
4. Simule el circuito de la figura 4.6.
5. Entregar al profesor en formato impreso o digital los puntos de las actividades previas que lo requieran al inicio de la práctica.

MATERIAL

- 1 Potenciómetro de $1\text{ M}\Omega$
- 1 Resistencia de $330\text{ k}\Omega$ a $\frac{1}{2}\text{ W}$
- 2 Resistencias de $47\text{ k}\Omega$ a $\frac{1}{2}\text{ W}$
- 1 Resistencia de $33\text{ k}\Omega$ a $\frac{1}{2}\text{ W}$
- 5 Resistencias de $10\text{ k}\Omega$ a $\frac{1}{2}\text{ W}$
- 2 Resistencias de $4.7\text{ k}\Omega$ a $\frac{1}{2}\text{ W}$
- 1 Capacitor de 10 nF
- 1 Capacitor de 1 nF
- 4 Amplificadores operacionales LM741 o TL081
- 1 Tableta de conexiones.
- Alambres para conexiones

EQUIPO

- 1 Fuente bipolar de CD
- 1 Generador de funciones
- 1 Multímetro
- 1 Osciloscopio

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

1. Arme el circuito de la figura 4.6.
2. Calibre las fuentes de voltaje a $+15\text{ V}$ y a -15 V .
3. Ajuste el generador de funciones para obtener una señal cuadrada de 1 V pico a pico con offset de 0.5 V y frecuencia de 100 Hz , verificar con el osciloscopio que la señal no tenga componentes negativas para lo cual se debe poner el canal en acople de directa.
4. Ajuste el potenciómetro P a su valor máximo de $1\text{ M}\Omega$. Para realizar la medición del valor de P , se debe desconectar la terminal del potenciómetro conectada a la terminal 2 del amplificador operacional y dejarla al aire para evitar la influencia de los elementos resistivos que forman al circuito y medir entre sus extremos.
5. Ajuste el osciloscopio para poder observar en la pantalla un ciclo completo de la señal escalón de entrada.
6. Realice pruebas con 5 valores del potenciómetro dentro del rango estable y una prueba para cuando el valor de P está fuera del rango de estabilidad. Anexe las gráficas de salida
7. Active el sistema y dibuje las señales de entrada $V_e(t)$ y de salida $V_s(t)$, indicando en cada una su voltaje pico a pico y la forma de onda.
8. Decremento el valor del potenciómetro observando el comportamiento de la señal de salida en cuanto a su amplitud pico, valor final, cantidad de oscilaciones, tiempo de asentamiento y estabilidad.
9. Mida y anote el valor del potenciómetro cuando el sistema se hace inestable.

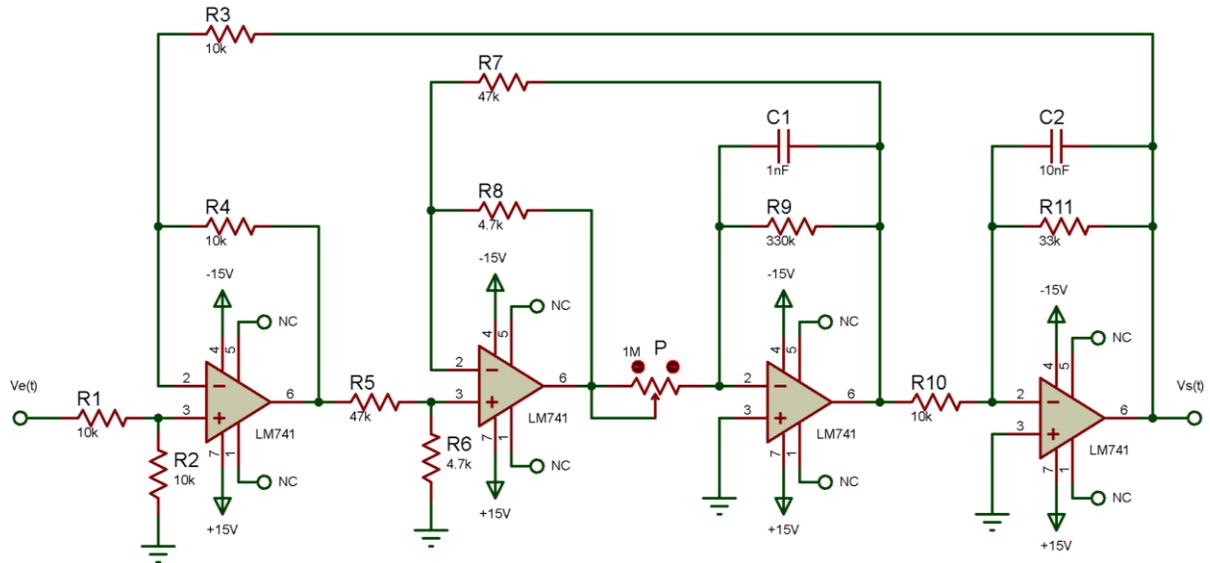


Figura 4.6

CUESTIONARIO

1. Defina el concepto de entrada y salida acotadas.
2. Como se modifica la respuesta del sistema al decrementar el valor del potenciómetro con respecto a amplitud pico, valor final, tiempo de asentamiento y oscilaciones.
3. Compare el valor teórico del potenciómetro P para mantenerse en la estabilidad calculado en las actividades previas con el valor práctico medido en el potenciómetro cuando el sistema llega a la inestabilidad.

Laboratorio de Ingeniería de Control

Práctica 5 Respuesta en el tiempo de sistemas de primer orden

TEMA

4.0. Análisis de respuesta en el tiempo.

OBJETIVOS

- El alumno obtendrá la función de transferencia de una malla RC y un motor de CD de primer orden.
- El alumno analizará el comportamiento de la respuesta transitoria para una entrada de tipo escalón.
- El alumno analizará las variaciones que se producen en la respuesta al modificar los parámetros del sistema.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de primer orden están definidos por una función de transferencia general dada por la siguiente relación:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{\tau s + 1} = \frac{\frac{1}{\tau}}{s + \frac{1}{\tau}}$$

Donde τ representa la constante de tiempo del sistema, la cual depende de los elementos que componen al dispositivo físico. En función de este parámetro se define el comportamiento en el tiempo de los sistemas de primer orden.

La velocidad de respuesta de un sistema de primer orden es directamente proporcional al valor de esta constante de tiempo, cuanto más pequeña es esta constante, más rápida es la respuesta y por lo tanto se alcanza en menor tiempo el valor final de la función.

Esta función de transferencia consta de un solo polo en $s = -\left(\frac{1}{\tau}\right)$ y por lo tanto representa a un sistema de primer orden.

Es importante hacer notar que todos los sistemas que presentan la misma dinámica o función de transferencia responden de la misma forma al excitarse con entradas similares.

Desarrollando la respuesta en el tiempo para una entrada escalón unitario $r(t) = u(t) = 1$, se obtiene que la señal de salida es:

$$c(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)}$$

Esta ecuación está formada de dos partes:

- Respuesta permanente definida por el valor (1)
- Respuesta transitoria definida por el término $-e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)}$, la cual se minimiza después de 5τ , tendiendo a cero de forma asintótica.

Si el escalón alimentado no es unitario $r(t) = A \cdot u(t)$ y el sistema tiene una ganancia k debida a los parámetros del sistema, entonces la ecuación de salida será:

$$c(t) = A \cdot k \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)}\right)$$

En esta práctica se observará el comportamiento de la respuesta transitoria de una malla RC y la respuesta del motor de CD al excitarlos con una señal de entrada tipo escalón.

Se observará que sus respectivas respuestas en el tiempo son iguales en forma y lo único que varía son los parámetros de los que depende la constante de tiempo τ y la ganancia. Las ecuaciones para ambos sistemas son las siguientes:

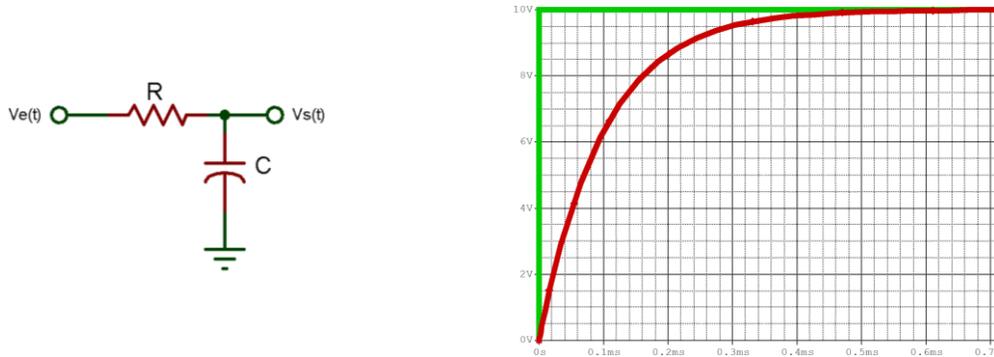


Figura 5.1 Circuito RC con entrada escalón y su respuesta en el tiempo

$$Vs(t) = Ve(t) \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)}\right)$$

Donde:

$\tau = RC =$ Constante de Tiempo

$Vs(t) =$ Voltaje de salida

$Ve(t) =$ Voltaje de entrada

Motor de CD controlado por armadura y respuesta a entrada escalón, se muestran en las figuras 5.2 y 5.3.

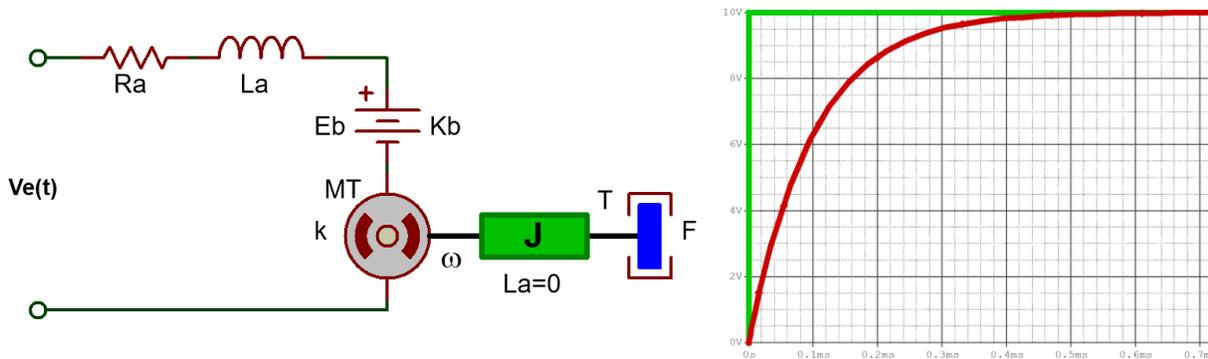


Figura 5.2 Motor de CD controlado por armadura y su respuesta en el tiempo

$$\omega(t) = Ve(t) \cdot km \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)}\right)$$

$$Vs(t) = \omega \cdot kg$$

$$Vs(t) = Ve(t) \cdot km \cdot kg \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)}\right)$$

Donde:

$\omega(t)$ = velocidad angular
 $V_e(t)$ = voltaje de entrada
 km = ganancia del motor
 kg = constante del tacogenerador = 0.003 V/rpm
 $V_s(t)$ = voltaje generado (salida)
 τm = constante de tiempo del motor

Las ecuaciones que definen a cada uno de los términos km y τm son:

$$km = \frac{k}{Ra \cdot f + k \cdot kb} \qquad \tau m = \frac{Ra \cdot J}{Ra \cdot f + k \cdot kb}$$

Variable	Descripción	Valor
La	Inductancia de armadura	considerada muy pequeña $La=0$
K	Constante del motor	6×10^{-5} libras-pie/amperio
Ra	Resistencia de armadura	0.2Ω
F	Fricción	4×10^{-4} libras-pie/rad/seg
Kb	Constante contraelectromotriz	5.5×10^{-2} voltios-seg/rad
J	Inercia	5.4×10^{-5} libras-pie-seg ²
T	Par torsional	
Eb	Fuerza contraelectromotriz	

Como se puede ver en las ecuaciones dadas anteriormente, para el circuito RC la constante de tiempo τ está en función de la resistencia y la capacitancia, pero para el motor la constante de tiempo τm está en función de una expresión más compleja debido a que depende de parámetros mecánicos (inercia, fricción viscosa y constante del motor).

ACTIVIDADES PREVIAS A LA PRÁCTICA

1. Realizar la lectura de la práctica de laboratorio.
2. Obtener la función de transferencia del motor de CD de la figura 5.2, considerando condiciones iniciales nulas, además de un valor despreciable para la inductancia de armadura ($La = 0$). Incluya las ecuaciones necesarias para su desarrollo. Debe obtenerse una relación igual a:

$$\frac{\omega(s)}{V_e(s)} = \frac{\frac{km}{\tau m}}{s + \frac{1}{\tau m}}$$

3. Obtener la función de transferencia de la malla RC de la figura 5.3 incluyendo el desarrollo de las ecuaciones para su definición.
4. Entregar al profesor en formato digital los puntos de las actividades previas que lo requieran al inicio de la práctica.

MATERIAL

- 1 Potenciómetro de $10 K\Omega$
- 1 Resistencia de $1 K\Omega$ a $\frac{1}{2} W$
- 1 Capacitor de $22 \mu F$
- 1 Tableta de conexiones
- Alambres para conexiones

EQUIPO

- Motor de CD DCM150F
- Fuente de alimentación PS150E
- Servo amplificador SA150D
- Unidad Tacogeneradora GTX150X
- 1 Osciloscopio
- 1 Generador de funciones
- 1 Multímetro
- Cables de conexión del Sevomecanismo Modular MS150

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

1. Arme el circuito de la figura 5.3

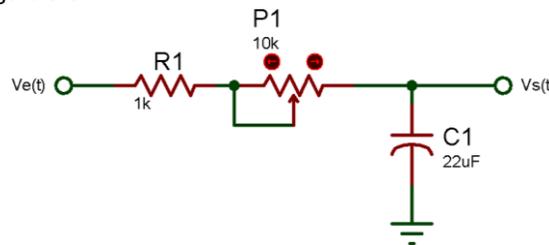


Figura 5.3

2. Calibre el generador de funciones con una señal cuadrada de 1Vpp con offset de 0.5 V y periodo de 4 segundos.
3. Modifique el valor del potenciómetro en intervalos de 2 KΩ y mida el tiempo de carga del capacitor en el osciloscopio, registrando los valores en la tabla 5.1.

P [KΩ]	t _{carga}
0	
2	
4	
6	
8	
10	

Tabla 5.1

4. Coloque las unidades del servomecanismo modular MS150 como lo muestra la figura 5.4, el motor no debe tener carga (sin freno magnético).
5. Calibre el generador de funciones con una señal cuadrada de 10 Vpp, con offset de 5 V. (solo positiva) y una frecuencia de 1 Hz.
6. Encienda el sistema y observe en el osciloscopio las señales; $V_e(t)$ de entrada en el generador de funciones y la señal $V_s(t)$ de salida en las terminales 2 y 1 (tierra) del tacogenerador de la unidad GTX150X. Dibuje ambas señales indicando los parámetros de tiempo de respuesta y amplitud de voltaje. Considere un ciclo completo de aceleración y desaceleración.
7. Apague el generador de funciones y el sistema.
8. Coloque el freno magnético y ajústelo en la posición cinco

9. Dibuje la señal de salida $V_s(t)$ para las posiciones 5 y 10 del freno magnético anotando sus observaciones con respecto a las variaciones que se producen con respecto a velocidad de respuesta y amplitud de voltaje de la salida $V_s(t)$. Considere un ciclo completo de aceleración y desaceleración.
10. Apague el generador de funciones y el sistema.

CUESTIONARIO

1. En que se parecen o difieren las curvas de respuesta de la malla RC y del motor de CD.
2. A partir de la función de transferencia del motor controlado por armadura, encuentre la respuesta $V_s(t)$ y gráfiquela considerando los valores calculados para km y τm a partir de los parámetros indicados en la introducción y $V_e(t) = 10V$, compárela con la curva del inciso 6 y anote sus observaciones.
3. Obtener matemáticamente la ecuación de respuesta en el tiempo $c(t)$ para un sistema de primer orden considerando una constante de tiempo $\tau = 2$ s. con entrada senoidal $V_e(t) = \text{Sen } 3t$ [V], gráfiquela de 0 a 20 segundos empleando un simulador matemático. Identificar la parte transitoria y la parte permanente de la ecuación.

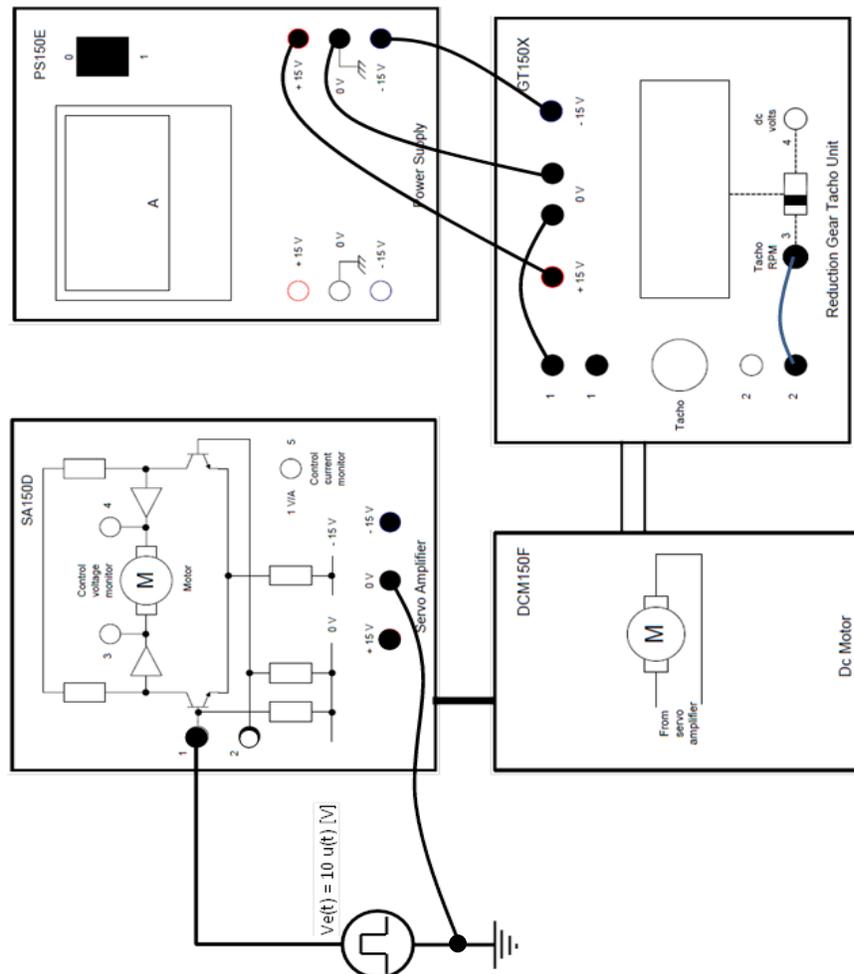


Figura 5.4

Laboratorio de Ingeniería de Control

Práctica 6 Emulación de sistema de segundo orden

TEMA

4.0 Análisis de respuesta en el tiempo.

OBJETIVOS

- El alumno analizará la respuesta de un sistema de segundo orden tomando en consideración sus parámetros principales como son: el sobrepaso, el tiempo de levantamiento, el tiempo de respuesta, el tiempo de asentamiento, etc.
- El alumno emulará dicho sistema utilizando amplificadores operacionales implementados en diversas configuraciones.
- El alumno observará como varían las características de su respuesta al alterar los parámetros que la rigen.

INTRODUCCIÓN

Un sistema de segundo orden es aquel descrito por la función de transferencia general:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

Donde se definen los parámetros:

$s = j\omega$	Variable compleja de Laplace
ω_n	Frecuencia natural no amortiguada
ζ	Constante de amortiguamiento
$C(s)$	Variable de salida.
$R(s)$	Variable de entrada

Los sistemas de segundo orden se clasifican en función del valor correspondiente de la constante de amortiguamiento ζ , presentándose cuatro casos:

- Caso **NO AMORTIGUADO** ($\zeta = 0$). No existe amortiguamiento por lo que se tiene una respuesta oscilatoria permanente, de aquí que el sistema tiene estabilidad limitada ya que el transitorio no se extingue.
- Caso **SUBAMORTIGUADO** ($0 < \zeta < 1$). Tiene una respuesta transitoria oscilante que se extingue en un periodo determinado de tiempo, llamado tiempo de asentamiento. Es el caso típico de un sistema de segundo orden ya que presenta todos los parámetros que lo caracterizan.
- Caso **CRITICAMENTE AMORTIGUADO** ($\zeta = 1$). Produce la velocidad de respuesta más rápida sin oscilaciones, no produce sobrepaso.
- Caso **SOBREAMORTIGUADO** ($\zeta > 1$). Su respuesta es muy lenta, no tiene ningún sobrepaso ni oscilaciones. Su respuesta es muy parecida a un sistema de primer orden.

Se pueden definir todos los parámetros de un sistema de segundo orden a partir del tipo de respuesta correspondiente al caso subamortiguado mostrado en la figura 6.1

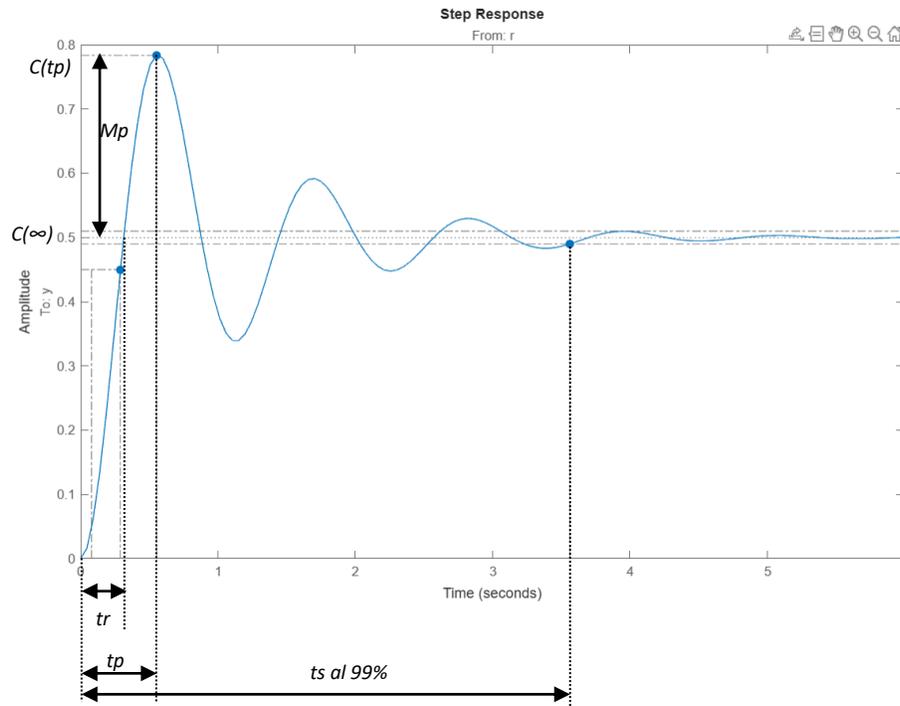


Figura 6.1

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$$

Frecuencia natural amortiguada

$$\sigma = \zeta \cdot \omega_n$$

Atenuación

$$Mp = e^{\frac{-\zeta \cdot \pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}}$$

Máximo sobrepaso

$$tr = \left(\frac{1}{\omega_d}\right) \tan^{-1} \left(-\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}\right) = \frac{\pi - \cos^{-1} \zeta}{\omega_d}$$

Tiempo de levantamiento

$$tp = \frac{\pi}{\omega_d}$$

Tiempo pico

$$ts(1\%) = \frac{5}{\zeta \cdot \omega_n}$$

Tiempo de asentamiento al 1%

DEFINICIONES

- **Máximo sobrepaso (Mp):** Es la máxima desviación con respecto al valor final de la respuesta del sistema. Generalmente se expresa como porcentaje de exceso del valor máximo $C(tp)$ de la salida con respecto al valor final $C(\infty)$.
- **Tiempo de levantamiento (tr):** Es el tiempo requerido para que la respuesta crezca del 0 al 100% de su valor final, este parámetro indica la rapidez de respuesta.
- **Tiempo pico (tp):** Es el tiempo requerido por la respuesta para alcanzar el primer máximo sobrepaso.
- **Tiempo de asentamiento (ts):** Es el tiempo requerido por la curva de respuesta para alcanzar y mantenerse dentro de determinado rango alrededor del valor final de dimensión especificada en porcentaje absoluto del valor final (habitualmente 98% o 99%).

En esta práctica se emulará el comportamiento de un sistema mecánico de segundo orden como el mostrado en la figura 6.2.

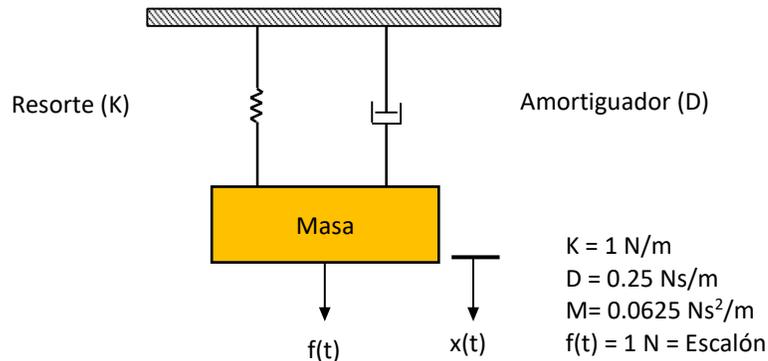


Figura 6.2

El análisis se realiza planteando las ecuaciones integro diferenciales de cuerpo libre del sistema y después realizando un proceso de escalamiento en amplitud para no sobrepasar los límites de saturación de los amplificadores operacionales, al mismo tiempo se sustituyen los valores de los parámetros del sistema.

$$f(t) - kx(t) - D \left(\frac{dx(t)}{dt} \right) = M \left(\frac{d^2x(t)}{dt^2} \right)$$

$$f(t) - kx(t) - D\dot{x}(t) = M\ddot{x}(t)$$

Para poder simular el sistema mecánico a través de amplificadores operacionales es necesario despejar de la ecuación del sistema a la variable con la derivada de mayor orden y asumir que la suma de términos del lado derecho de la expresión es igual a dicho término, como se indica en la siguiente ecuación y en la figura 6.3.

$$\ddot{x}(t) = \frac{1}{M} [f(t)] - \frac{D}{M} [\dot{x}(t)] - \frac{k}{M} [x(t)]$$

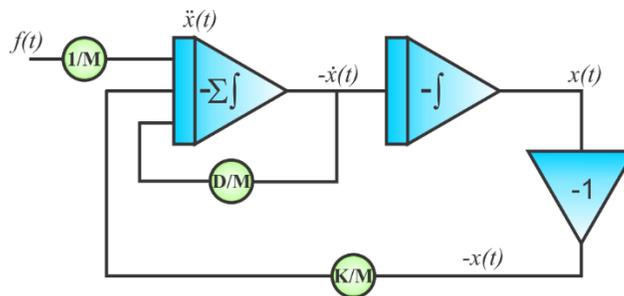


Figura 6.3 Diagrama de simulación.

Sustituyendo los valores de los parámetros:

$$\ddot{x}(t) = \frac{1}{0.0625} [f(t)] - \frac{0.25}{0.0625} [\dot{x}(t)] - \frac{1}{0.0625} [x(t)]$$

$$\ddot{x}(t) = 16[f(t)] - 4[\dot{x}(t)] - 16[x(t)]$$

Los factores de escalamiento son los valores que se aplican a la expresión para evitar que el voltaje de salida de cada operacional exceda el nivel máximo de alimentación de las fuentes de C.D.

Para obtenerlos se propone que la salida máxima tenga un voltaje $x(t) = 5 \text{ sen } 4t$ [V], lo cual representa una señal senoidal (la máxima posible para sistema estable) con un máximo voltaje a la salida de 5V pico (propuesta por el diseñador) y una frecuencia natural no amortiguada de 4 rad/s (determinada a partir de la función de transferencia del sistema), por lo tanto, la señal original $x(t)$ y las derivadas correspondientes para este sistema serían:

$$\begin{aligned}x(t) &= 5 \text{ sen } 4t \\ \dot{x}(t) &= 5(4) \cos 4t = 20 \cos 4t \\ \ddot{x}(t) &= -20(4) \text{ sen } 4t = -80 \text{ sen } 4t\end{aligned}$$

De acuerdo a estos cálculos se pueden obtener los valores absolutos máximos para la señal original y sus derivadas:

$$\begin{aligned}\text{Máximo valor de } |x(t)| &= 5 = Sx \\ \text{Máximo valor de } |\dot{x}(t)| &= 20 = S\dot{x} \\ \text{Máximo valor de } |\ddot{x}(t)| &= 80 = S\ddot{x}\end{aligned}$$

Aplicando el factor de escalamiento a la ecuación original:

$$\begin{aligned}\ddot{x}(t) \frac{S\ddot{x}}{S\ddot{x}} &= 16[f(t)] - 4[\dot{x}(t)] \frac{S\dot{x}}{S\dot{x}} - 16[x(t)] \frac{Sx}{Sx} \\ \ddot{x}(t) \frac{S\ddot{x}}{S\ddot{x}} &= 16[f(t)] - 4[\dot{x}(t)] \frac{S\dot{x}}{S\dot{x}} - 16[x(t)] \frac{Sx}{Sx} \\ x_e''(t) S\ddot{x} &= 16[f(t)] - 4x_e'(t) S\dot{x} - 16x_e(t) Sx\end{aligned}$$

Donde los cocientes entre corchetes se definen como las variables escaladas, las cuales permiten limitar los niveles máximos de las señales de salida de cada uno de los amplificadores operacionales

$$x_e''(t) = \left[\frac{\ddot{x}(t)}{S\ddot{x}} \right] \quad x_e'(t) = \left[\frac{\dot{x}(t)}{S\dot{x}} \right] \quad x_e(t) = \left[\frac{x(t)}{Sx} \right]$$

Sustituyendo los valores máximos y despejando a la derivada escalada de mayor orden

$$\begin{aligned}x_e''(t) 80 &= 16[f(t)] - 4x_e'(t) 20 - 16x_e(t) 5 \\ x_e''(t) &= \frac{16}{80} [f(t)] - \frac{4(20)}{80} x_e'(t) - \frac{16(5)}{80} x_e(t) \\ x_e''(t) &= 0.2[f(t)] - x_e'(t) - x_e(t)\end{aligned}$$

Por lo tanto, por analogía de los coeficientes:

$$\frac{1}{M} = 0.2 \quad ; \quad \frac{D}{M} = 1 \quad ; \quad \frac{K}{M} = 1$$

El diagrama de emulación que debe implementarse para resolver la ecuación diferencial escalada en amplitud se muestra en la figura 6.3.

ACTIVIDADES PREVIAS A LA PRÁCTICA

1. Realizar la lectura de la práctica de laboratorio.
2. Obtener la función de transferencia $X(s)/F(s)$ del sistema mecánico de la figura 6.2 incluyendo todo el desarrollo matemático para obtenerla e indicar a cuál de los cuatro casos de amortiguamiento corresponde en función de sus parámetros ω_n y ζ .
3. Calcular los parámetros ζ , ω_n , σ , ω_d , t_r , t_p , $t_s(1\%)$, M_p , $c(\infty)$ y $c(tp)$.
4. Entregar al profesor en formato digital los puntos de las actividades previas que lo requieran al inicio de la práctica.

MATERIAL

- 3 Potenciómetros de 20 k Ω .
- 6 Resistencias de 10 k Ω a ½ W
- 2 Capacitores de 1 nF
- 3 Circuitos integrados LM 741 o TL 081
- 1 Tableta de conexiones
- Alambres y cables para conexiones

EQUIPO

- 1 Fuente bipolar de CD
- 1 Generador de funciones
- 1 Multímetro
- 1 Osciloscopio

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

1. Arme el circuito de la figura 6.4.
2. Calibre los tres potenciómetros ($\frac{1}{M}$, $\frac{D}{M}$, $\frac{K}{M}$) al valor indicado por los coeficientes de la ecuación escalada en amplitud. La medición del valor debe efectuarse con el potenciómetro desconectado y midiendo la resistencia entre el cursor (terminal central) y la terminal que se va a conectar a tierra. El valor de calibración para cada potenciómetro en k Ω se obtendrá al realizar el producto del coeficiente de la ecuación por el valor del potenciómetro que es de 20 k Ω .

$$\frac{1}{M} = 0.2 = 0.2 * 20K\Omega = 4K\Omega ; \quad \frac{D}{M} = 1 = 1 * 20K\Omega = 20K\Omega ; \quad \frac{K}{M} = 1 = 1 * 20K\Omega = 20K\Omega$$

3. Calibre el generador de funciones con una señal cuadrada de 5Vpp, 2.5 V de offset y una frecuencia de 100Hz, mida la señal con el osciloscopio en acoplo de directa para asegurarse que no tiene componente negativa, debe ajustarse el nivel de corrimiento (offset) hasta sobreponer esta señal con la línea de tierra.
4. Observe la señal $x(t)$ en la salida del segundo integrado y mida los parámetros M_p , t_r , t_p y t_s . Considere que los valores teóricos de los tiempos deben obtenerse al multiplicar los valores prácticos por 25330.29 que es la ganancia combinada de los 2 integradores y el inversor.
5. Tome en cuenta que la medición de los parámetros se realiza en la parte transitoria de la señal de salida y por lo tanto puede ser necesario abrir la escala de tiempo para ver la parte transitoria en la zona donde se produce la subida del escalón unitario de entrada.
6. Manteniendo los potenciómetros D/M y K/M en sus valores originales varíe el parámetro 1/M para tres diferentes valores, como se indica en la tabla 6.1 y dibuje la gráfica de $x(t)$ para cada uno de ellos.

Potenciómetro	Valor 1	Valor 2	Valor 3
1/M	20 KΩ	10 KΩ	6 KΩ

Tabla 6.1

7. Regrese el potenciómetro 1/M a su valor original.
8. Manteniendo los potenciómetros 1/M y K/M en sus valores originales varíe el parámetro D/M para tres diferentes valores, como se indica en la tabla 6.2 y dibuje la gráfica de $x(t)$ para cada uno de ellos.

Potenciómetro	Valor 1	Valor 2	Valor 3
D/M	1 KΩ	5 KΩ	10 KΩ

Tabla 6.2

9. Regrese el potenciómetro D/M a su valor original.
10. Manteniendo los potenciómetros 1/M y D/M en sus valores originales varíe el parámetro K/M para tres diferentes valores, como se indica en la tabla 6.3 y dibuje la gráfica de $x(t)$ para cada uno de ellos.

Potenciómetro	Valor 1	Valor 2	Valor 3
K/M	1 KΩ	5 KΩ	10 KΩ

Tabla 6.3

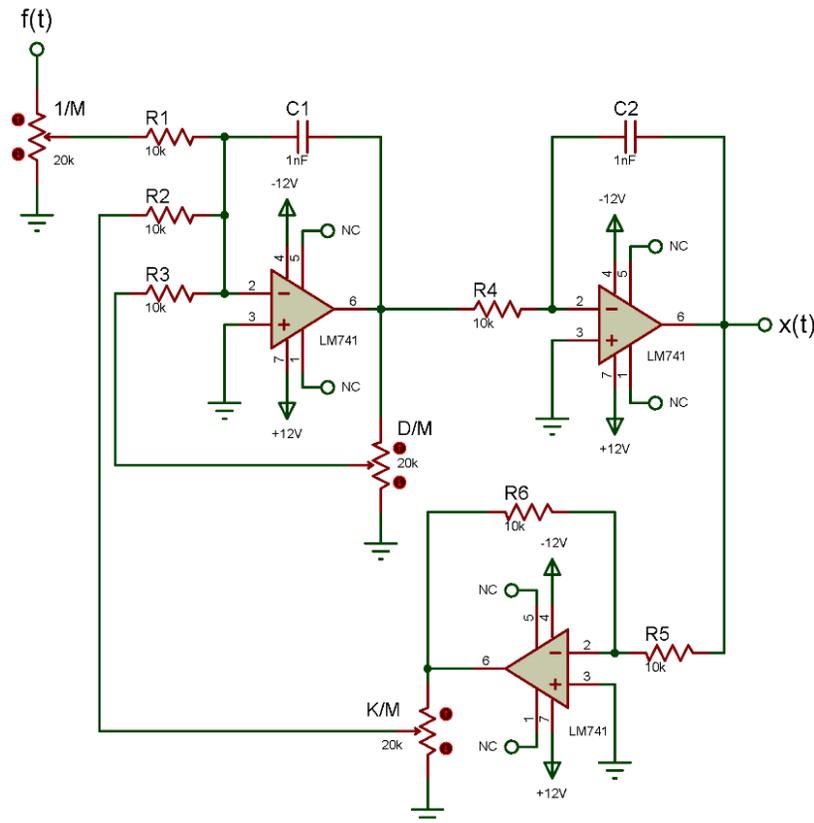


Figura 6.4

CUESTIONARIO

1. Realice una tabla comparativa entre los valores teóricos (M_p , t_r , t_p y t_s) obtenidos en la actividad previa y los valores prácticos obtenidos en el inciso 4 y anote sus observaciones. Para hacer la comparación se deben multiplicar los valores t_r , t_p y t_s prácticos por un factor igual a 25,330.29 que es la ganancia total de los tres Amps–Ops. a una frecuencia de 100 Hz.
2. Empleando herramientas computacionales, tabule y grafique la respuesta $x(t)$ a intervalos de 0.2 s. desde $t = 0$ hasta $t = 3$ s y compárela con la gráfica obtenida en el punto 4 del desarrollo.
3. Indique que parámetro controla cada uno de los potenciómetros y porque causa varía la forma de la respuesta $x(t)$ al variar los parámetros $1/M$, D/M y K/M en los puntos 6, 8 y 10.

Laboratorio de Ingeniería de Control

Práctica 7 Control de posición con controlador proporcional

TEMA

6.2. Acciones básicas de control.
6.2.2 Control proporcional (P).

OBJETIVOS

- El alumno comprobará los efectos que se producen en la respuesta en el tiempo de un sistema de control de posición realimentado al variar los parámetros de ganancia en trayectoria directa, carga (rozamiento viscoso).
- El alumno comprobará en qué forma se afecta la estabilidad del sistema al variar los parámetros mencionados.
- El alumno obtendrá el modelo del sistema y a partir de éste determinará la función de transferencia.

INTRODUCCIÓN

El objetivo primordial de un control de posición es alcanzar y mantener la posición de salida del sistema lo más cercana posible a la posición de referencia. Los controladores de posición generalmente se emplean para procesos con movimiento lineal o movimiento angular y para la implementación de estos sistemas, comúnmente se usan los servomecanismos.

Para controlar la posición angular por medio del servomecanismo modular MS150, se utiliza el potenciómetro de entrada IP150H, a través del cual se ajusta en forma manual la posición angular de referencia y como señal de salida se obtiene la posición angular del potenciómetro de salida OP150K el cual es controlado por el tren de engranes del sistema.

En la implementación de este control de posición, el servomecanismo se utilizará en la configuración de control por armadura, con lo cual se obtiene en el eje del motor, una velocidad proporcional al voltaje de alimentación en los bornes de su armadura y el cual a su vez es proporcional a la diferencia entre la posición de entrada y la posición de salida o sea la señal de error $e(t)$, si esta diferencia de posición es grande, entonces se aplicará un voltaje de alimentación elevado y por lo tanto la velocidad del servomecanismo será alta, tratando de reducir la diferencia entre las dos posiciones.

Si la diferencia es nula, entonces el voltaje aplicado al motor es cero y el motor debe estar inmóvil, sin embargo, debido a los diferentes parámetros que intervienen en el comportamiento del control de posición tales como: inercia, carga, ganancia, fricción, etc., el motor puede seguir girando aun cuando la diferencia de posiciones sea nula y en este caso podría ser inestable.

Un actuador muy común en los sistemas de control es el motor de CD. Este actuador provee movimiento rotacional y acoplado con engranes, poleas y cables puede proveer también un movimiento traslacional.

Este sistema tiene un circuito eléctrico equivalente para control por armadura y un diagrama de cuerpo libre para el rotor como se muestra en la figura 7.1.

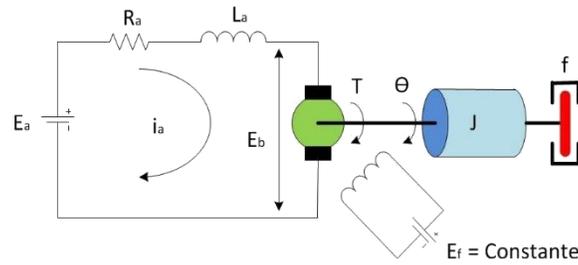


Figura 7.1

Considerando que la entrada del sistema es el voltaje de alimentación en la armadura \$E_a(s)\$ y la salida del sistema es la velocidad angular en el eje del motor \$\omega(s)\$, se obtiene el siguiente diagrama de bloques:

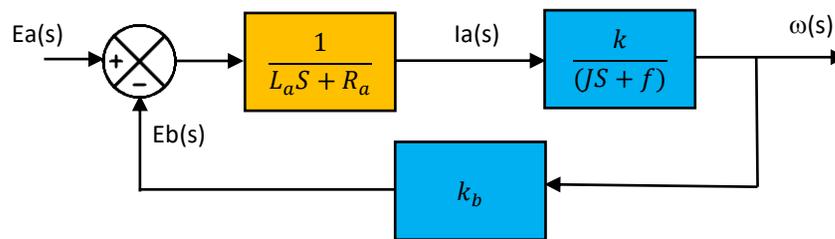


Figura 7.2

Que proporciona una función de transferencia:

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{k}{L_a J s^2 + (L_a f + R_a J) s + (R_a f + K K_b)}$$

Donde:

\$K\$ = Constante de par motor.

\$L_a\$ = Inductancia del devanado del inducido.

\$J\$ = Inercia equivalente referida al eje del motor a través del tren de engranes.

\$f\$ = Fricción viscosa equivalente referida al eje del motor a través del tren de engranes.

\$R_a\$ = Resistencia del devanado de la armadura.

\$K_b\$ = Constante de fuerza contraelectromotriz.

$$K = 6 \cdot 10^{-5} \text{ [lb-ft/A]}$$

$$L_a = 0 \text{ (despreciable)}$$

$$J = 5.4 \cdot 10^{-5} \text{ [lb-ft-s}^2\text{]}$$

$$f = 4 \cdot 10^{-4} \text{ [lb-ft/rad/s]}$$

$$R_a = 0.2 \text{ [\Omega]}$$

$$K_b = 5.5 \cdot 10^{-2} \text{ [V-s/rad]}$$

Utilizando esta planta **G(s)** se puede construir un sistema de control de posición realimentado considerando los siguientes elementos:

- Un potenciómetro de entrada (IP150H) que produce una referencia $\theta_e(t)$ que es convertida a un voltaje a través de la ganancia **Kr**.
- Un amplificador diferencial (OA150A) empleado como comparador de voltaje con una ganancia **K1**.
- Un potenciómetro (AU150B) que permite controlar la ganancia de trayectoria directa **K2**.

- Un preamplificador (PA150C) que controla el sentido de giro del motor y la velocidad con ganancia K_p .
- Un tren de engranes con relación de reducción N_1/N_2 y que además funciona como un integrador pues convierte la velocidad angular $\omega(s)$ a una posición angular $\theta s(s)$.
- Un potenciómetro de salida que gira a la posición deseada $\theta s(s)$ y además convierte esta posición a un voltaje de salida $Vs(s)$ que se utiliza como realimentación negativa.

En la figura 7.3 se presenta el diagrama eléctrico de conexiones del sistema de control de posición y en la figura 7.4 muestra el diagrama de bloques del sistema de control de posición angular.

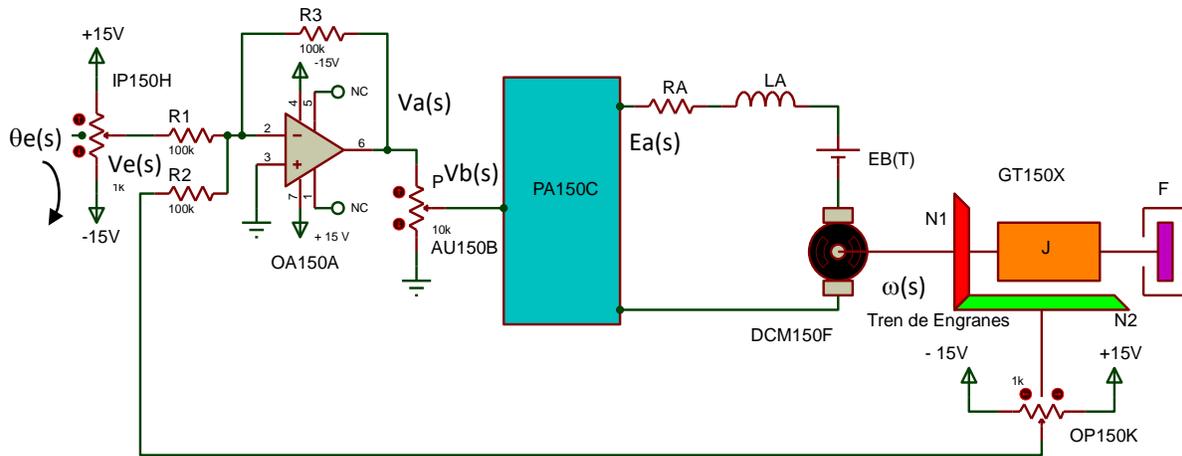


Figura 7.3

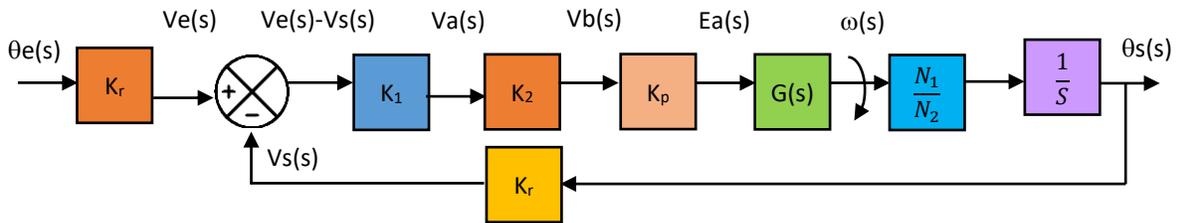


Figura 7.4

K_r = Ganancia del detector de error potenciométrico = 0.083 [V/°]

K_1 = Ganancia del amplificador operacional comparador = -1

K_2 = Atenuación del potenciómetro del módulo AU150B

$$K_2 = \frac{\text{Posicion de AU150B}}{10}$$

K_p = Ganancia del preamplificador PA150C = -10

$G(s)$ = Función de transferencia de Laplace del motor de CD.

N_1/N_2 = Relación de reducción del tren de engranes = 1/10

ACTIVIDADES PREVIAS A LA PRÁCTICA

1. Realizar la lectura de la práctica de laboratorio.
2. Del diagrama de bloques de la figura 7.4, obtener la función de transferencia $\theta s(s)/\theta e(s)$.

3. Obtener la respuesta en el tiempo $\theta s(t)$ para una entrada escalón unitario, incluya todo el desarrollo.
4. Obtener el lugar geométrico de las raíces del sistema, indicando todos los puntos del desarrollo.
5. Entregar al profesor en formato digital los puntos de las actividades previas que lo requieran al inicio de la práctica.

EQUIPO

Unidad atenuadora	AU150B
Potenciómetro de entrada	IP150H
Unidad de carga	LU150L
Servomecanismo de CD	DCM150F
Potenciómetro de salida	OP150K
Amplificador operacional	OA150A
Preamplificador	PA150C
Fuente de alimentación	PS150E
Servo amplificador	SA150D
1 Generador de funciones	
1 Osciloscopio	
1 Multímetro	
Cables de conexión	

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

1. Arme el sistema que se muestra en la figura 7.7, teniendo cuidado al acoplar el potenciómetro OP150 K con el eje lento del motor comprobando que las flechas estén alineadas.
2. Gire la perilla selectora del módulo OA150A hasta la izquierda para tener una realimentación unitaria.
3. Seleccione una ganancia del potenciómetro $K_2 = 1$ de la unidad AU150B, esto se logra al mover el potenciómetro para que su voltaje de salida sea el mismo que su voltaje de entrada.
4. Ajuste el nivel de corrimiento (offset) del módulo OA150A, desconectando los cables que tenga en sus entradas 2 y 3 y conectándolos a tierra de forma temporal como se muestra en la figura 7.5.

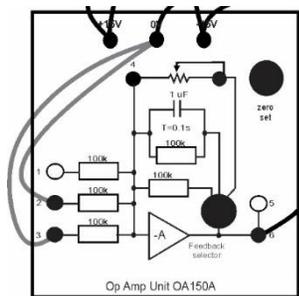


Figura 7.5

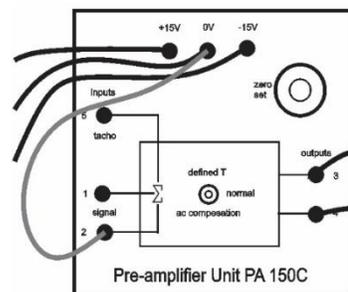


Figura 7.6

5. Encienda el sistema y compruebe que la salida del módulo OA150A sea cero volts, si no es así, mueva la perilla de offset hasta obtener un voltaje lo más cercano posible a cero volts, apague el equipo.
6. Quite las conexiones a tierra y reconecte las entradas 2 y 3 con sus conexiones originales.
7. Ajuste el nivel de corrimiento (offset) del módulo PA150C, desconectando el cable que tiene en su entrada 2 y conectándolo a tierra de forma temporal como se muestra en la figura 7.6.
8. Encienda el sistema y compruebe que la salida del módulo PA150C sea cero volts, si no es así, mueva la perilla de offset hasta obtener un voltaje lo más cercano posible a cero volts, apague el equipo.
9. Quite la conexión temporal de la entrada 2 a tierra y reconecte la entrada con su conexión original.

10. Encienda el sistema y varíe la posición de entrada del módulo IP150H hacia ambos sentidos. Observe que el módulo OP150K gire en el mismo sentido que IP150H llegando finalmente a una posición similar a la de referencia. (Si gira en sentido contrario intercambie las polarizaciones de +15V y -15V de la unidad IP150H).
11. Varíe la posición del potenciómetro IP150H con giros bruscos, observe y anote sus comentarios acerca de la respuesta del sistema al reducir paulatinamente la ganancia de K_2 a los valores $K_2 = 1$, $K_2 = 0.5$ y $K_2 = 0.2$.
12. Apague el equipo.
13. Calibre el generador de funciones con una señal cuadrada de 10 Vpp y un periodo de 4 s.
14. Retire el potenciómetro de entrada IP150H y sustitúyalo por el generador de funciones como se muestra en la figura 7.8.

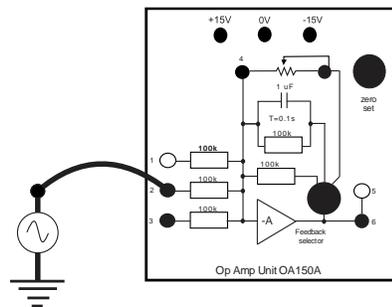


Figura 7.8

15. Encienda el sistema y obtenga las gráficas de velocidad y posición para tres diferentes valores de la ganancia de trayectoria directa: $K_2 = 1$, $K_2 = 0.5$ y $K_2 = 0.2$, conectando el canal 1 del osciloscopio a la salida del tacogenerador para la gráfica de velocidad y conectando el canal 2 del osciloscopio en el potenciómetro de salida para la gráfica de posición.
16. Observar y anotar el comportamiento del error en estado estable y la velocidad de respuesta de las gráficas anteriores.
17. Para observar el efecto de aumentar la carga, coloque el freno magnético en la posición 10, obtenga la gráfica y comente acerca del comportamiento de la posición de salida para los mismos valores de K_2 del inciso 15.

CUESTIONARIO

1. Mencione cómo es el comportamiento de la velocidad de respuesta y el error en estado estable al reducir paulatinamente la ganancia de trayectoria directa K_2 .
2. Obtenga la respuesta en el tiempo teórica del sistema para una entrada escalón de 10V con $K_2 = 0.4$ indicando las diferencias en rapidez, error en estado estable, amortiguamiento y ganancia con respecto a la respuesta práctica.
3. Indique los efectos que se presentan en el error en estado estable al introducir una carga en el eje.

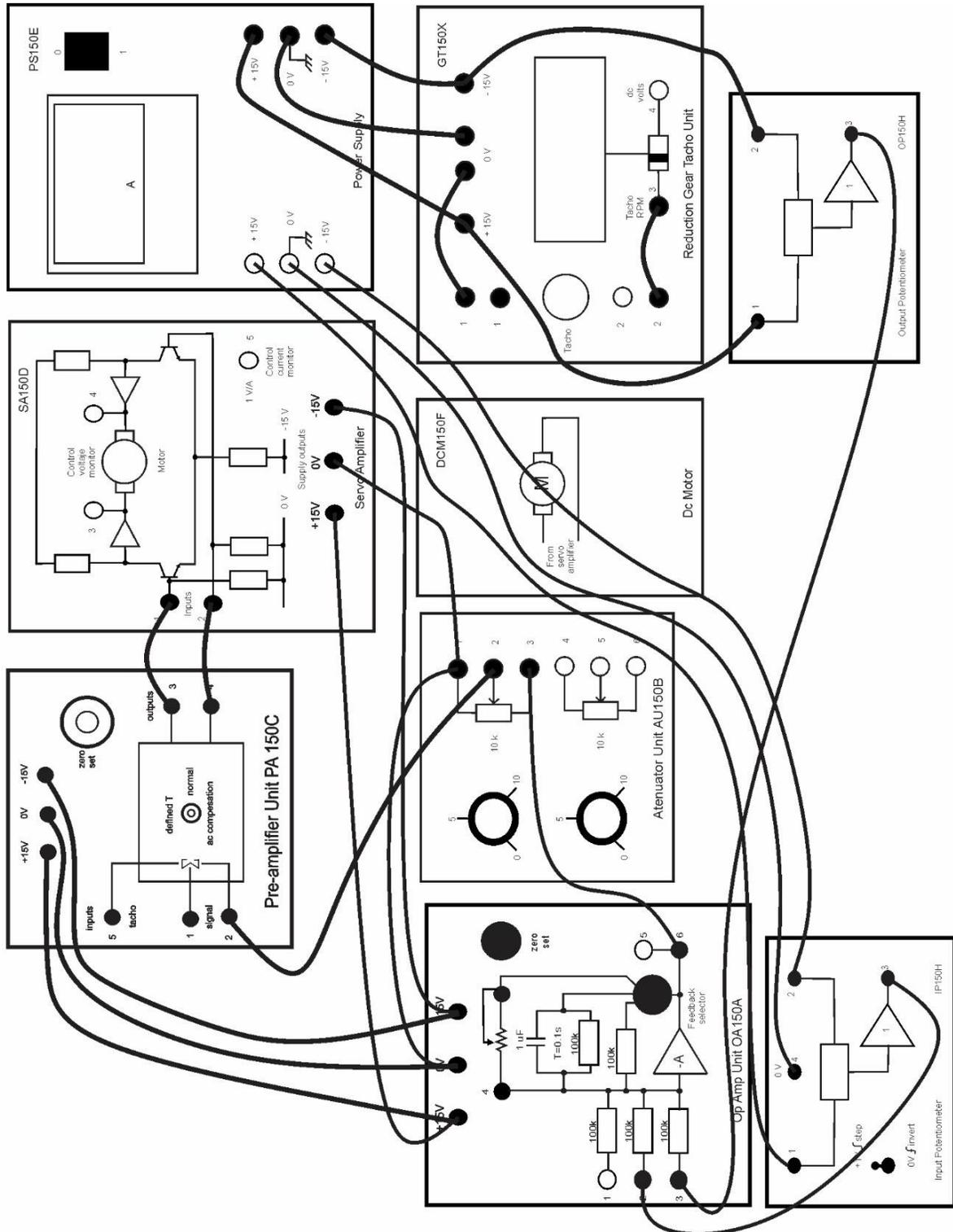


Figura 7.7

Laboratorio de Ingeniería de Control

Práctica 8 Controlador proporcional integral

TEMA

6.2. Acciones básicas de control.

6.2.5 Control proporcional integral (PI).

OBJETIVOS

- El alumno analizará los efectos de un controlador proporcional integral aplicado a un sistema de segundo orden.
- El alumno interpretará los efectos de la inserción de un controlador proporcional integral en un sistema realimentado.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de control realimentado no siempre cumplen los parámetros de funcionamiento deseados tales como: velocidad de respuesta, máximo sobreimpulso, tiempo de asentamiento, frecuencia de oscilación, etc., debido a las relaciones que existen entre los elementos que forman al dispositivo y a la dinámica del sistema.

Muchos sistemas realimentados usualmente presentan una diferencia con respecto al valor final $c(\infty)$, a este valor lo denominamos error en estado estable, el cual es una medida de la exactitud de un sistema de control para seguir una entrada dada después de desaparecer la respuesta transitoria y es provocado por la incapacidad del sistema de seguir determinados tipos de entradas.

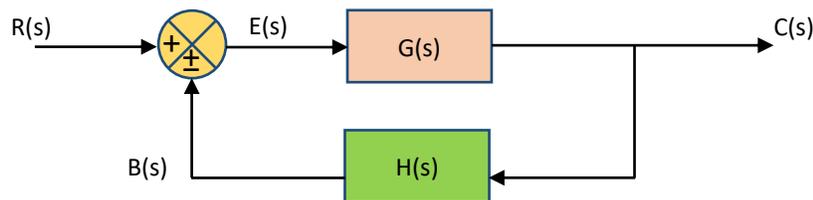


Figura 8.1

Una posible solución a estos problemas es la modificación de la planta del sistema $G(s)$ o de la realimentación $H(s)$, pero no siempre se puede cambiar la estructura del dispositivo, debido a la imposibilidad de acceder a los elementos internos o por restricciones de acceso.

Una segunda opción es la aplicación de un sistema adicional e independiente que modificará matemáticamente a la función de transferencia total del sistema, pero sin tocar la planta ni la realimentación de forma directa, a este elemento adicional se le denomina **controlador $G_c(s)$** , el cual puede insertarse en cualquier parte del sistema de acuerdo con las necesidades de diseño.

La estructura de estos controladores define los ceros, polos y ganancia de la función de transferencia que serán compensados para obtener las modificaciones necesarias para lograr los parámetros de respuesta que el diseñador requiere.

Una forma común para la aplicación de un controlador es colocarlo a la salida de la señal de error $E(s)$ generada por el comparador de magnitud, logrando con ello la modificación de la señal y produciendo una nueva señal modificada denominada señal de error actuante $M(s)$ tal y como se muestra en la figura 8.2.

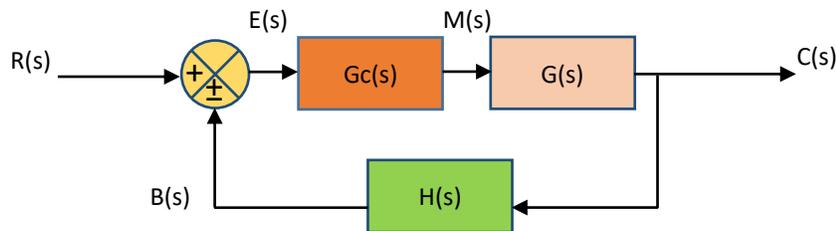


Figura 8.2

Hay que hacer énfasis en que el controlador puede ser insertado en cualquier posición dentro del sistema y por lo tanto la modificación lograda dependerá de forma directa del controlador y las relaciones con el sistema original.

La función de transferencia de los controladores puede tener cualquier forma, pero entre los más utilizados están los siguientes:

- On – Off
- Proporcional (P)
- Integral (I)
- Derivativo (D)
- Proporcional Integral (PI)
- Proporcional Derivativo (PD)
- Proporcional Integral y Derivativo (PID)

Cada uno de ellos proporciona una serie de ventajas y desventajas, por lo que deben seleccionarse de forma adecuada para no degradar el funcionamiento del sistema que queremos controlar.

En la presente práctica se implementará un controlador proporcional integral para modificar la respuesta de un sistema de segundo orden construido con amplificadores operacionales. Este controlador conjunta las características del controlador proporcional y el integral produciendo un efecto combinado que mejora el rendimiento de la planta que estamos controlando.

La acción de control proporcional se utiliza para incrementar la velocidad de respuesta y para reducir el valor del error en estado estable, aunque podría generar una mayor oscilación y tender a la inestabilidad, la acción de control integral contribuye de forma matemática con un polo en el origen y por lo tanto incrementa el tipo de la función reduciendo a cero el error en estado estable para una entrada escalón y función tipo 0, pero el lugar geométrico de las raíces puede ser atraído hacia el eje imaginario y por lo tanto reduce el rango de estabilidad y tiende a la inestabilidad.

La ecuación que define a un controlador proporcional integral analógico es la siguiente:

$$M(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt$$

$$M(s) = K_p E(s) + \frac{K_i E(s)}{s}$$

$$\frac{M(s)}{E(s)} = k_p + \frac{K_i}{s}$$

Y su función de transferencia en el dominio de Laplace es la siguiente, considerando que la constante de integración es inversamente proporcional al tiempo de integración y directamente proporcional a la constante de proporcionalidad.

$$\frac{M(s)}{E(s)} = \frac{K_p s + K_i}{s}$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i}$$

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left[\frac{\left(s + \frac{1}{T_i} \right)}{s} \right]$$

Este controlador proporciona un cero de primer orden que puede compensar a un polo de la planta o simplemente generar una función diferente y además inserta un polo en el origen que incrementa el tipo de la función $G(s)H(s)$, contribuyendo a la reducción o a la eliminación del error, la ganancia total permite mover la posición de los polos sobre el lugar geométrico de las raíces.

De acuerdo con la expresión que define el error actuante $M(s)$, se puede observar que puede implementarse a través de 2 bloques separados que evalúan al controlador proporcional y al controlador integral como se muestra en la figura 8.3.

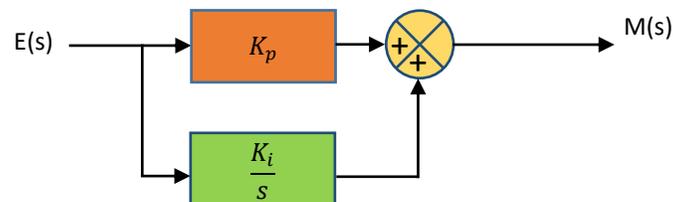


Figura 8.3

Donde $E(s)$ es la señal de error y $M(s)$ es la señal de error actuante modificada por la acción del controlador.

ACTIVIDADES PREVIAS A LA PRÁCTICA

1. Realizar la lectura de la práctica de laboratorio.
2. Obtener la función de transferencia del sistema de la figura 8.4 empleando cualquier método de solución e incluir el desarrollo.
3. Obtener la función de transferencia del controlador Proporcional Integral (PI) de la figura 8.5 e incluir el desarrollo.
4. Entregar a su profesor al inicio de la práctica.

MATERIAL

- 2 Potenciómetros de 50 kΩ
- 2 Resistencias 47kΩ a ½ W
- 10 Resistencias 10kΩ a ½ W
- 2 Resistencias 33kΩ a ½ W
- 2 Resistencias 4.7kΩ a ½ W
- 1 Capacitor 100nF
- 2 Capacitores 10nF
- 7 Amplificadores Operacionales LM741 o TL081
- 1 Tableta de conexiones

Alambres para conexiones

EQUIPO

- 1 Fuente de CD bipolar
- 1 Generador de Funciones
- 1 Osciloscopio
- 1 Multímetro

DESARROLLO

1. Arme el circuito de la figura 8.4, considere que la unión entre la señal $E(t)$ y $M(t)$ es solo un cable que se eliminará posteriormente.

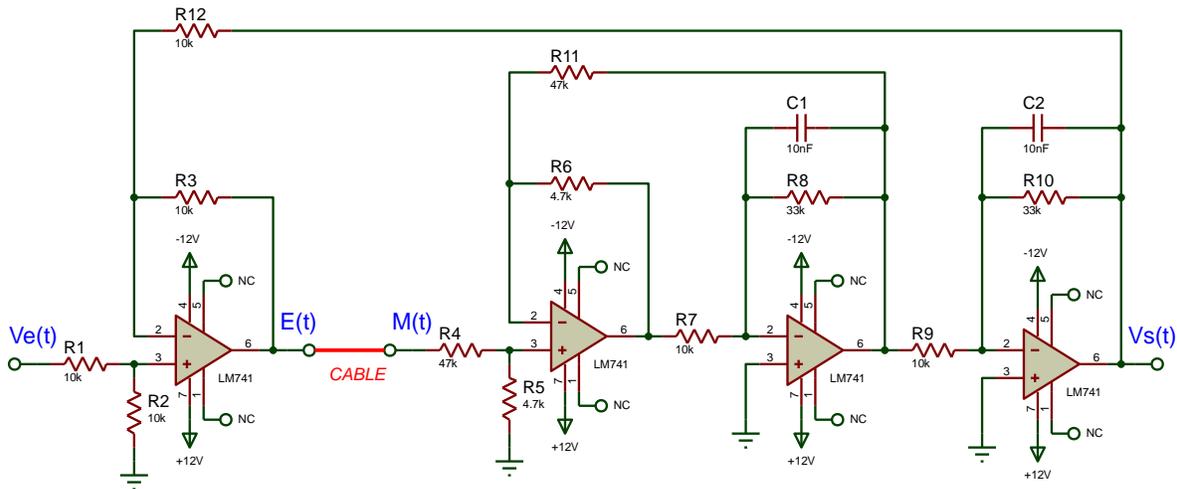


Figura 8.4

2. Calibre la fuente bipolar de voltaje a $\pm 12\text{Vcd}$.
3. Ajuste el generador de funciones para obtener una señal cuadrada $V_e(t)$ de 1 V de amplitud pico a pico y una frecuencia de 40Hz, con offset de 0.5 V.
4. Dibuje la señal de entrada $V_e(t)$ y de salida $V_s(t)$, identifique las características que presenta la señal de salida, error, parámetros de tiempo, amplitud, tipo de respuesta, oscilaciones, etc.
5. Elimine el cable que une la señal de error $E(t)$ con la señal $M(t)$ e inserte el circuito del controlador proporcional integral PI de la figura 8.5 entre estos dos puntos.
6. El controlador proporcional integral tendrá como entrada a la señal $E(t)$ que proviene de la terminal 6 del primer amplificador operacional y la salida $M(t)$ del controlador proporcional integral deberá conectarse a la resistencia R4 de 47 K Ω .
7. Calibre el potenciómetro P1 a un valor de 25 K Ω y el potenciómetro P2 a un valor de 50 K Ω . Dichos valores serán considerados sus valores originales. Cabe recordar que el ajuste de los potenciómetros debe hacerse con una terminal desconectada.
8. Observe y anote los cambios producidos al insertar el controlador.
9. Considere que los efectos más notorios de la respuesta se presentan en la parte transitoria y por lo tanto puede ser necesario que ajuste la perilla del tiempo para expandir la señal de salida y poder visualizar de forma adecuada la zona transitoria en el flanco de subida de la señal de entrada.

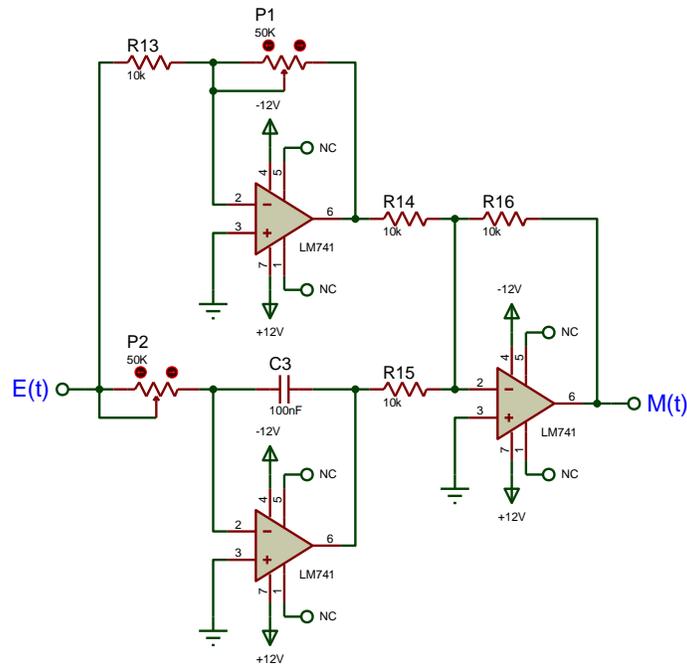


Figura 8.5

10. Modifique el valor del potenciómetro P_1 a los valores: $P_1 = 30K\Omega$, $P_1 = 40K\Omega$ y $P_1 = 50K\Omega$. En cada caso, dibuje la señal de entrada $V_e(t)$ y de salida $V_s(t)$, comente el comportamiento del error en estado estable de la señal de salida, anote que otros cambios se producen al modificar el valor de la ganancia K_p .

$$K_p = -\frac{P_1}{R_{13}}$$

11. Regrese P_1 a su valor original.
12. Modifique el valor del potenciómetro P_2 a los valores: $P_2 = 30K\Omega$, $P_2 = 20K\Omega$ y $P_2 = 10K\Omega$. En cada caso, dibuje la señal de entrada $V_e(t)$ y de salida $V_s(t)$, observe y anote los cambios que se producen al modificar el valor de la ganancia K_i .

$$K_i = \left| \frac{1}{2\pi f P_2 C_3} \right|$$

13. Gire ambos potenciómetros para lograr observar los 4 casos de amortiguamiento. Dibuje la señal de entrada $V_e(t)$ y de salida $V_s(t)$ en cada caso.

CUESTIONARIO

1. Realice el análisis teórico de funcionamiento en el tiempo empleando un simulador matemático, sin el controlador y después aplicando el controlador, incluya el desarrollo de comandos para obtener las respuestas en el tiempo.
2. Entregue junto con el reporte todos los elementos necesarios para realizar los cálculos.

Laboratorio de Ingeniería de Control

Práctica 9 Controlador proporcional integral y derivativo

TEMA

- 6.2. Acciones básicas de control.
6.2.7 Control proporcional integral y derivativo (PID).

OBJETIVOS

- El alumno analizará los efectos de un controlador proporcional integral y derivativo aplicado a un sistema de segundo orden.
- El alumno interpretará los efectos de la inserción de un controlador proporcional integral y derivativo en un sistema realimentado.

INTRODUCCIÓN

En la presente práctica se implementará un controlador proporcional integral y derivativo **PID** para modificar la respuesta del sistema de segundo orden construido con amplificadores operacionales de la práctica anterior, en donde observaremos que el controlador de tipo derivativo adicionado al controlador **PI**, produce un amortiguamiento de las oscilaciones del sistema, con lo cual podemos establecer un balance entre los 3 controladores individuales, proporcional, integral y derivativo para obtener la mejor respuesta en el tiempo.

La ecuación que define a un controlador proporcional integral y derivativo analógico es la siguiente:

$$M(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

$$M(s) = K_p E(s) + \frac{K_i E(s)}{s} + K_d s E(s)$$

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$$

Y su función de transferencia en el dominio de Laplace es la siguiente, considerando que la constante de integración es inversamente proporcional al tiempo de integración y directamente proporcional a la constante de proporcionalidad y la constante derivativa es directamente proporcional a la constante de proporcionalidad y el tiempo derivativo.

$$\frac{M(s)}{E(s)} = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s}$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad , \quad K_d = K_p T_d$$

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p T_d \left[\frac{s^2 + \left(\frac{1}{T_d}\right)s + \left(\frac{1}{T_i T_d}\right)}{s} \right]$$

Este controlador proporciona dos ceros que pueden compensar a dos polos de la planta o simplemente generar una función diferente, además inserta un polo en el origen que incrementa el tipo de la función $G(s)H(s)$, contribuyendo a la reducción o eliminación del error en estado estable y finalmente el controlador

modifica la ganancia total de la función de transferencia lo que permite mover la posición de los polos sobre el lugar geométrico de las raíces y modificar así la forma de la respuesta en el tiempo.

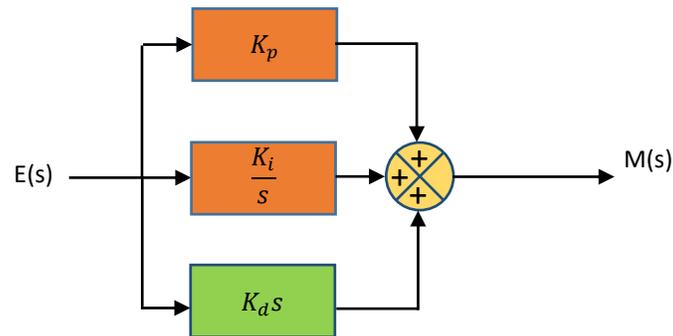


Figura 9.1

Donde $E(s)$ es la señal de error y $M(s)$ es la señal de error actuante modificada por la acción del controlador.

En esta práctica se implementará un controlador **PID**, pero usando una estructura diferente a la forma canónica tradicional debido a que es una implementación más compacta pero que presenta una función de transferencia similar al **PID** canónico.

ACTIVIDADES PREVIAS A LA PRÁCTICA

1. Realizar la lectura de la práctica de laboratorio.
2. Obtener la función de transferencia del controlador Proporcional Integral y Derivativo **PID** de la figura 9.3 e incluir el desarrollo.

MATERIAL

- 10 Resistencias 10kΩ a ½ W
- 2 Resistencias 47kΩ a ½ W
- 2 Resistencias 33kΩ a ½ W
- 2 Resistencia 4.7kΩ a ½ W
- 2 Capacitor 100nF
- 2 Capacitores 10nF
- 1 Potenciómetros de 50 kΩ
- 6 Amplificadores Operacionales LM741 o TL081
- 1 Tableta de conexiones
- Alambres y cables para conexiones

EQUIPO

- 1 Fuente de CD bipolar
- 1 Generador de Funciones
- 1 Osciloscopio
- 1 Multímetro

DESARROLLO

- Arme el circuito de la figura 9.2, considere que la unión entre la señal $E(t)$ y $M(t)$ es sólo un cable que se eliminará posteriormente.

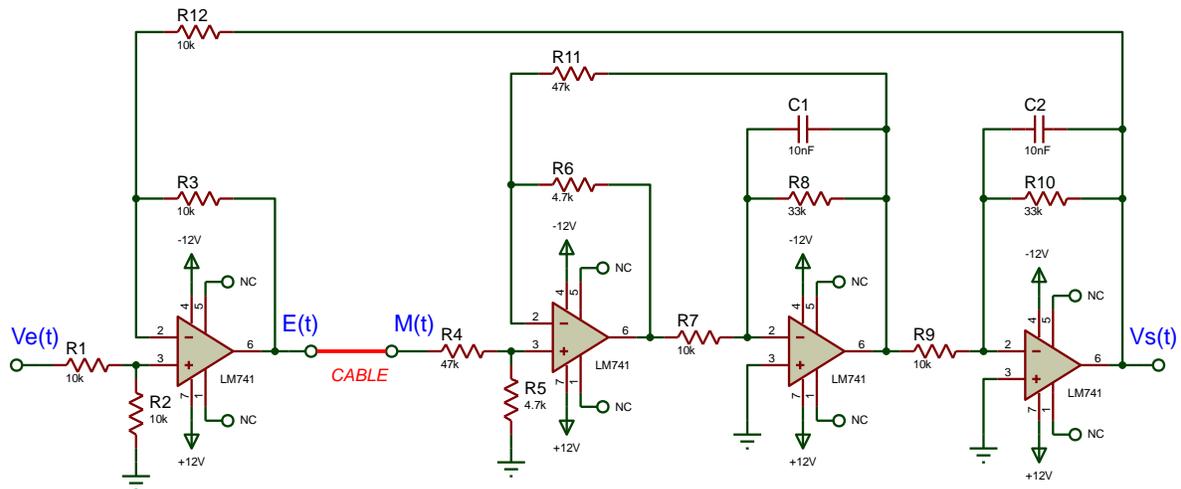


Figura 9.2

- Calibre la fuente bipolar de voltaje a $\pm 12\text{Vcd}$.
- Ajuste el generador de funciones para obtener una señal cuadrada $V_e(t)$ de 1 V de amplitud pico a pico y una frecuencia de 40Hz, con offset de 0.5 V.
- Dibuje la señal de entrada $V_e(t)$ y de salida $V_s(t)$, identifique las características que presenta la señal de salida, error, parámetros de tiempo, amplitud, tipo de respuesta, oscilaciones, etc.
- Elimine el cable que une la señal de error $E(t)$ con la señal $M(t)$ e inserte el circuito de la figura 9.3 entre estos dos puntos.

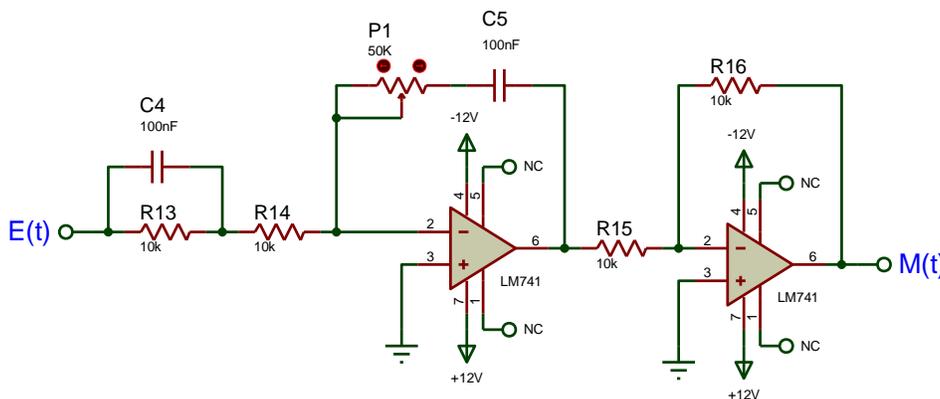


Figura 9.3

- El controlador proporcional integral y derivativo tendrá como señal de entrada $E(t)$ la terminal 6 del primer amplificador operacional y la salida del controlador $M(t)$ deberá conectarse a la resistencia $R4$ de 47 K Ω .
- Calibre el potenciómetro $P1 = 50\text{K}\Omega$.
- Modifique el valor del potenciómetro $P1$ a los siguientes valores: $P1 = 40\text{K}\Omega$, $P1 = 30\text{K}\Omega$, $P1 = 20\text{K}\Omega$, $P1 = 10\text{K}\Omega$ y $P1 = 1\text{K}\Omega$. En cada caso, dibuje la señal de entrada $V_e(t)$ y de salida $V_s(t)$, observe y anote los cambios que se producen al modificar el valor de la ganancia.

CUESTIONARIO

1. Realice el análisis teórico de funcionamiento en el tiempo empleando un simulador matemático, sin el controlador y después aplicando el controlador Proporcional Integral y Derivativo **PID**, incluya el desarrollo de comandos para obtener las respuestas en el tiempo.
2. Entregue junto con el reporte todos los elementos necesarios para realizar los cálculos.

Laboratorio de Ingeniería de Control

Práctica 10 Respuesta en frecuencia

TEMA

- 5.1 Obtención de la respuesta en frecuencia de funciones de transferencia de sistemas de control.
- 5.2 Compensación empleando técnicas de respuesta en frecuencia.

OBJETIVOS

- El alumno obtendrá experimentalmente la respuesta en frecuencia de un filtro activo.
- El alumno hallará analíticamente la función de transferencia del filtro y graficará los diagramas de amplitud y fase de Bode.
- El alumno comparará los resultados experimentales y teóricos.

INTRODUCCIÓN

El análisis de respuesta en frecuencia es un método gráfico empleado para diseñar, predecir y ajustar el comportamiento de los sistemas de control. Se emplea también para determinar experimentalmente la función de transferencia de sistemas complicados sin necesidad de conocer las relaciones que lo describen.

La respuesta en frecuencia de un sistema se define como la respuesta en estado de régimen permanente para una entrada senoidal de amplitud fija pero con frecuencia variable en un cierto rango.

El análisis de respuesta en frecuencia presenta varias ventajas:

- Es fácil obtener la respuesta en frecuencia de un sistema en forma experimental pues sólo se requiere de generadores de señales sinusoidales y equipos de medición precisos.
- El comportamiento del régimen sinusoidal permanente del sistema puede deducirse a partir de la función de transferencia, simplemente sustituyendo el operador de Laplace (S) por $(j\omega)$, por lo tanto, la $F(t)$ sinusoidal es una función compleja de variables complejas y en general puede representarse por un módulo y un argumento.
- Es posible deducir una función de transferencia de un sistema físico a partir del comportamiento experimental de la respuesta en frecuencia.

Existen varios métodos gráficos que permiten obtener la respuesta en frecuencia de un sistema de control:

- Diagramas de Bode
- Diagramas de Nyquist
- Diagramas de Nichols

Cada uno de ellos se emplea para hacer análisis específicos de comportamiento con respecto a estabilidad o compensación de los sistemas de control.

En esta práctica se utilizará uno de los métodos de respuesta en frecuencia denominado diagrama de Bode o diagrama semilogarítmico, el análisis de Bode permite obtener 2 diagramas separados, uno de la frecuencia contra la magnitud logarítmica de la función de transferencia y el otro de la frecuencia contra la fase de la función de transferencia.

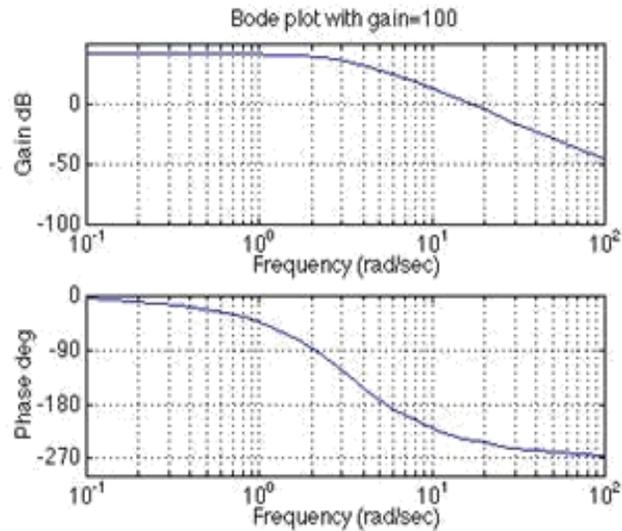


Figura 10.1 Diagrama de amplitud y fase de Bode

En esta práctica se implementará un filtro activo realizado con amplificadores operacionales y elementos discretos tales como resistencias y capacitores y sobre este sistema se realizará un análisis de comportamiento para variaciones en la frecuencia de la señal de entrada.

La señal de entrada será una señal senoidal de amplitud y fase fijas y de frecuencia variable la que se aplicará a la entrada del sistema y se comprobará a través de las mediciones de la magnitud y fase de la salida el funcionamiento del sistema como elemento de filtrado.

En esta práctica se obtendrán experimentalmente los diagramas de amplitud y de fase para el filtro activo para después poderlo comparar con la respuesta teórica.

ACTIVIDADES PREVIAS A LA PRÁCTICA

1. Realizar la lectura de la práctica de laboratorio.
2. Obtener la función de transferencia $Vs(s)/Ve(s)$ del filtro mostrado en la figura 10.2.
3. Empleando herramientas computacionales, obtener los diagramas de amplitud y fase exactos de Bode utilizando las fórmulas para el cálculo de cada uno de los términos, incluya la tabulación.
4. Con base en una gráfica semilogarítmica mencione la forma de determinar si un filtro presenta ganancia o atenuación.
5. Entregar al profesor en formato digital los puntos de las actividades previas que lo requieran al inicio de la práctica.

MATERIAL

- 3 Resistencia de 10 k Ω a ½ W
- 1 Resistencia de 8.2 k Ω a ½ W
- 1 Resistencia de 3.9 k Ω a ½ W
- 1 Resistencia de 1.2 k Ω a ½ W
- 2 Capacitores de 15 nF
- 2 Amplificadores operacionales LM741 o TL081
- 1 Tableta de conexiones
- Alambres y cables para conexiones

EQUIPO

- 1 Fuente de voltaje de CD bipolar
- 1 Generador de funciones
- 1 Osciloscopio
- 1 Multímetro

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

1. Arme el circuito de la figura 10.2.
2. Ajuste la fuente de voltaje bipolar a ± 12 Vcd.
3. Ajuste el generador de funciones con una señal senoidal $V_e(t) = 2 \text{ Sen } 12566.37 t$ [V].

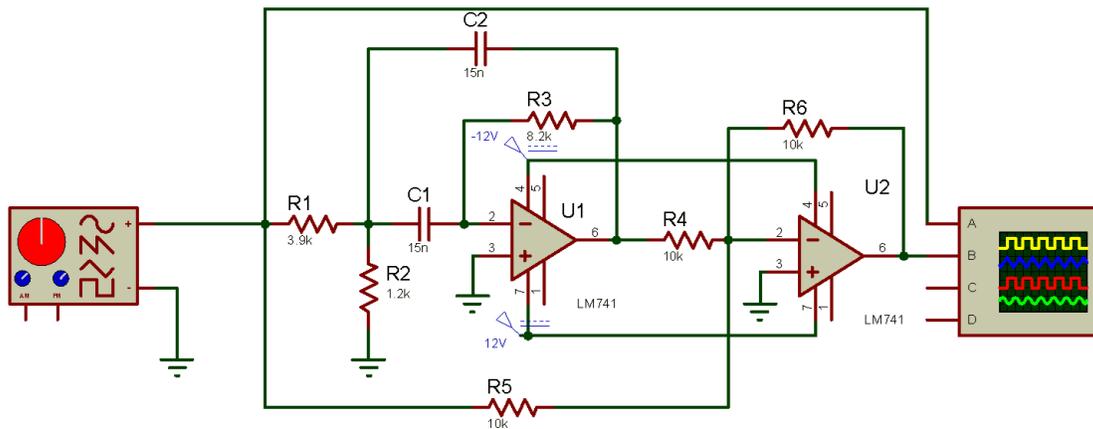


Figura 10.2

4. Active el sistema y dibuje las señales $V_e(t)$ y $V_s(t)$ en una sola gráfica, solo para esa frecuencia.

Frecuencia	$V_s(t)$ [V]	θ [°]	Frecuencia	$V_s(t)$ [V]	θ [°]
10 Hz			1 KHz		
20 Hz			2 KHz		
30 Hz			3 KHz		
50 Hz			4 KHz		
80 Hz			5 KHz		
100 Hz			6 KHz		
300Hz			12 KHz		
500 Hz			13 KHz		
700 Hz			15 KHz		
900 Hz			18 KHz		

Tabla 10.1

5. Varíe la frecuencia de la señal de entrada $V_e(t)$ desde 10 Hz hasta 18 kHz registrando los valores de amplitud pico de $V_s(t)$ y la fase en la tabla 10.1.

CUESTIONARIO

1. Con los datos obtenidos en la tabla 10.1 elabore la gráfica de frecuencia f contra ganancia (db) en una hoja de papel semilogarítmico. Graficando la frecuencia f en el eje logarítmico (eje x) y la ganancia (db) en el eje lineal (eje y).

$$A (db) = 20 \log \left(\frac{V_s}{V_e} \right)$$

2. Con los datos obtenidos en la tabla 10.1 elabore el diagrama de fase de Bode en una hoja de papel semilogarítmico, (f) eje logarítmico y (θ) eje lineal.
3. Con base en las gráficas obtenidas determine qué tipo de filtro es el que se implementó en la práctica.
4. Compare las gráficas de las actividades previas con las obtenidas experimentalmente, anote sus observaciones con respecto a los valores de amplitud y pendiente.
5. Indique como modificaría la función de transferencia del filtro para cambiar la frecuencia de corte del sistema.