

---

UNAM

---

FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLÁN



**Departamento:**

Ingeniería

**Asignatura:**

Teoría de Control y Robótica

**Sección:**

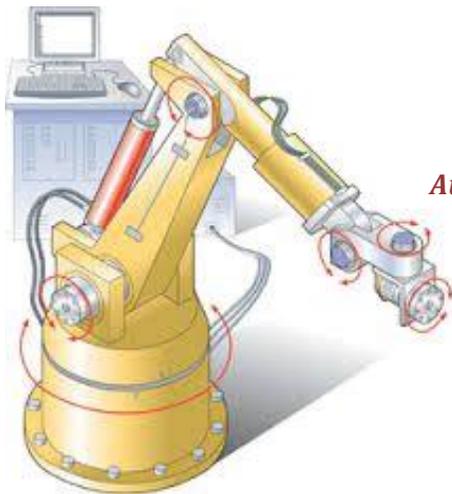
Electrónica

**Clave de carrera:** 116

**Clave de asignatura:** 1824

## *Manual de Laboratorio de Teoría de Control y Robótica*

---



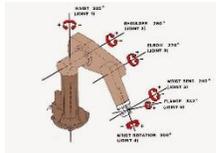
*Autores: M. en C. Leopoldo Martín del Campo Ramírez  
Dr. David Tinoco Varela*

*Fecha de elaboración: julio 2015*

*Fecha de revisión: enero 2025*

*Semestre 2025-2*

---



Laboratorio de Teoría de Control y Robótica

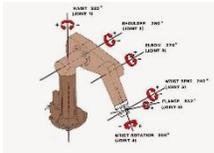


Índice

|  |            |
|--|------------|
| <b>Objetivos generales de la asignatura</b>  | <b>II</b>  |
| <b>Objetivos del curso experimental</b>  | <b>II</b>  |
| <b>Introducción</b>  | <b>II</b>  |
| <b>Reglamento interno de laboratorios</b>  | <b>III</b> |
| <b>Instrucciones para la elaboración del reporte</b>                                 | <b>V</b>   |
| <b>Criterios de evaluación del curso</b>   | <b>V</b>   |
| <b>Bibliografía</b>  | <b>VI</b>  |
| <b>Práctica 1    Introducción al sistema de simulación de circuitos electrónicos</b> | <b>1</b>   |
| 1.1. Definiciones.   |            |
| <b>Práctica 2    Detección mediante sensores</b>                                     | <b>10</b>  |
| 7.1 Sensores de posición y de velocidad.   |            |
| 7.5 Sensores de fuerza.  |            |
| <b>Práctica 3    Modelado de sistemas con amplificadores operacionales</b>           | <b>15</b>  |
| 1.1. Definiciones.   |            |
| <b>Práctica 4    Respuesta en el tiempo de sistemas de 1º orden</b>                  | <b>24</b>  |
| 1.2. Estabilidad en los sistemas de control.   |            |
| <b>Práctica 5    Respuesta en el tiempo de sistemas de 2º orden</b>                  | <b>28</b>  |
| 1.2. Estabilidad en los sistemas de control.   |            |
| <b>Práctica 6    Controlador P (Proporcional)</b>                                    | <b>33</b>  |
| 1.6. Controladores proporcionales-integrales.  |            |
| <b>Práctica 7    Controlador PI</b>  | <b>37</b>  |
| 1.6. Controladores proporcionales-integrales.  |            |
| <b>Práctica 8    Controlador PID</b>   | <b>41</b>  |
| 1.8. Controlador proporcional-integral-derivativo.                                   |            |

## Laboratorio de Teoría de Control y Robótica

## Prólogo



## Objetivo general de la asignatura

- Al finalizar el curso el alumno conocerá las características de control, diseño, selección y aplicación de los robots industriales.

## Objetivos del curso experimental

- Obtener la función de transferencia que representa el comportamiento dinámico de un sistema físico.
- Determinar el tipo de estabilidad de un sistema y aplicar correcciones empleando controladores.

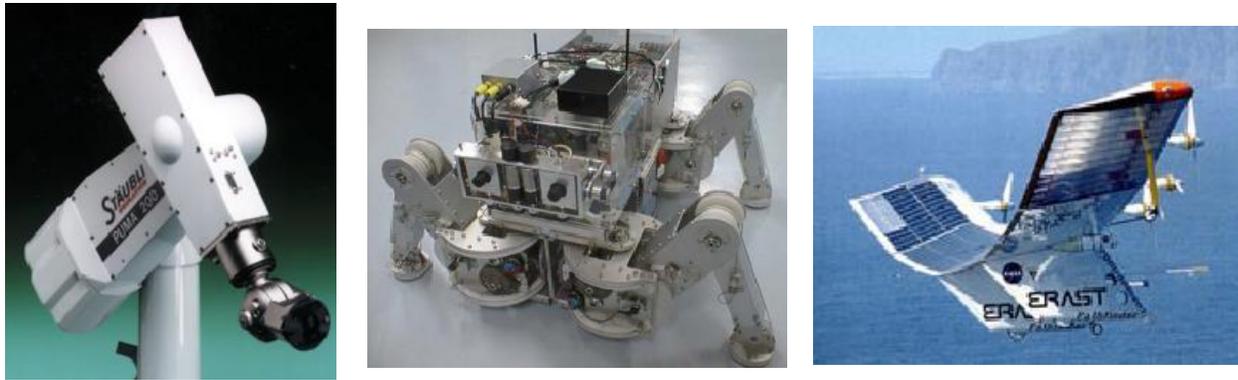
## Introducción

No existe una definición de lo que es un robot que sea ampliamente aceptada sin embargo, de manera general, se puede decir que un robot es un dispositivo mecánico controlable por software que emplea sensores para guiar uno o más efectores finales a través de movimientos programados en un espacio de trabajo con el fin de manipular objetos físicos.

Los brazos robóticos industriales, también llamados manipuladores son una colección de eslabones interconectados por medio de articulaciones flexibles. Al final de dichos eslabones se encuentra una herramienta o efector final.

Los robots pueden clasificarse en distintas categorías definidas por ciertas características, como pueden ser.

- **Tecnología de movimiento.** De acuerdo a la fuente de poder que impulsa las articulaciones del robot, por ejemplo, motores eléctricos o electro hidráulicos.
- **Geometría del espacio de trabajo.** Puntos en el espacio los cuales pueden ser alcanzados por el efector final, por ejemplo robots cartesianos y espaciales.
- **Método de control de movimiento.** Su movimiento se define ya sea punto a punto o por una ruta continua.
- **Tipo de movilidad.** Como se mueven, por ejemplo ruedas o patas.



**Figura I.** Robot manipulador (izquierda), robot con patas (centro) y robot aéreo autónomo (derecha).

## Reglamento interno de laboratorios

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 clases 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/](http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/))

- b) Presente su circuito armado en la tableta de conexiones para poder realizar la práctica (cuando aplique), de no ser así, tendrá una evaluación de cero en la sesión correspondiente.
  - c) Realizar las actividades previas y entregarlas antes del inicio de la sesión de práctica, de no ser así, tendrá una evaluación de cero en la sesión correspondiente.
5. Estudiante que no asista a la sesión de práctica de laboratorio será evaluado con cero.
  6. 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.
  7. 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 y el 80% de prácticas acreditadas con base en los criterios de evaluación.**
    - b) **(No Aprobado) No cumplió con los requisitos mínimos establecidos en el punto anterior.**
    - c) **(No Presentó) Cuando no asistió a ninguna sesión de laboratorio o que no haya entregado actividades previas o reporte alguno.**
  8. Profesores que requieran hacer uso de las instalaciones de laboratorio para realizar trabajos o proyectos, es requisito indispensable que las soliciten por escrito al jefe de sección. Siempre y cuando no interfiera con los horarios de los laboratorios.
  9. 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.
  10. Correo electrónico del buzón para quejas y sugerencias para cualquier asunto relacionado con los laboratorios ([seccion\\_electronica@cuautitlan.unam.mx](mailto:seccion_electronica@cuautitlan.unam.mx)).
  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. 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, indicándose en el reporte de fallas correspondiente.
  13. Los usuarios de laboratorio que sean sorprendidos haciendo uso indebido de equipos, materiales, instalaciones y demás implementos, serán sancionados conforme a la legislación universitaria que le corresponda, según la gravedad de la falta cometida.
  14. Los casos no previstos en el presente reglamento serán resueltos por el Jefe de Sección, de acuerdo con los lineamientos generales para el uso de los laboratorios en la Universidad Nacional Autónoma de México.

## Instrucciones para la elaboración del reporte

Será necesario incluir en cada actividad previa y reporte de práctica una portada (obligatoria) que contenga la información mostrada a continuación.

|                       |             |
|-----------------------|-------------|
|                       | U. N. A. M. |
|                       | F. E. S. C. |
| Laboratorio de:       | _____       |
| Grupo:                | _____       |
| Profesor:             | _____       |
| Alumno:               | _____       |
| Nombre de Práctica:   | _____       |
| No. de Práctica:      | _____       |
| Fecha de realización: | _____       |
| Fecha de entrega:     | _____       |
| Semestre:             | _____       |

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

- Introducción
- Procedimiento experimental
- Tablas de datos
- Mediciones
- Gráficas
- Comentarios
- Observaciones
- Esquemas
- Diagramas
- Cuestionario
- Conclusiones
- Bibliografía

y en general todos los elementos solicitados dentro del desarrollo de la práctica.

## Criterios de evaluación del curso

C1 (Criterio de evaluación 1): Análisis y simulación del circuito (30%)

C2 (Criterio de evaluación 2): Habilidad en el armado y funcionalidad de los sistemas (20%)

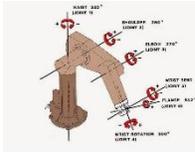
C3 (Criterio de evaluación 3): Habilidad para el manejo del equipo e interpretación correcta de las lecturas (20%)

C4 (Criterio de evaluación 4): Reporte entregado con todos los puntos indicados (30%)

---

## Bibliografía

- 1) **Sistemas de Control Automático**  
Kuo, Benjamín C.  
Pearson, 7<sup>o</sup> Edición  
2005
- 2) **Ingeniería de control**  
Bolton, W.  
Alfaomega, 2<sup>o</sup> Edición  
2001
- 3) **Ingeniería de control moderna**  
Ogata, Katsuhiko  
Pearson, 5<sup>o</sup> Edición  
Madrid, 2010
- 4) **Robótica: guía teórica y práctica**  
Zabala, Gonzalo  
Editorial Gradi  
España, 2007
- 5) **Introduction to Robotics:  
mechanics and control**  
Craig, J.  
Prentice Hall  
USA, 2004
- 6) **Robots Dynamics and Control**  
Spong, M.  
Editorial John Wiley and Sons  
USA, 2007
- 7) **Robótica, manipuladores y robots  
móviles**  
Ollero, Anibal  
Alfaomega - Marcombo  
México, 2007



## Laboratorio de Teoría de Control y Robótica

### Práctica 1

#### Introducción al sistema de simulación de circuitos electrónicos



## Tema

### 1.1. Definiciones.

## Objetivos

Al término de esta práctica el alumno:

- Estará familiarizado con el ambiente de simulación y armado de circuitos electrónicos mediante el uso de software.
- Podrá conocer el comportamiento ideal de algunos circuitos electrónicos básicos para poder compararlos con los resultados prácticos de los circuitos armados en laboratorio comprobando así los resultados.

## Introducción

Industria 4.0, el concepto también señalado como Industria inteligente o Ciber-industria del futuro corresponde a una nueva manera de organizar los medios de producción. El objetivo que pretende alcanzarse es la puesta en marcha de un gran número de "fábricas inteligentes" capaces de una mayor adaptabilidad a las necesidades y a los procesos de producción, así como a una asignación más eficaz de los recursos, abriendo así la vía a una nueva revolución industrial o Cuarta revolución industrial. Las bases tecnológicas en que se apoya esta orientación, entre otras son las siguientes: 1. Internet de las cosas; 2. Sistemas ciberfísicos; 3. Cultura "Hágalo usted mismo"; 4. Fábrica 4.0...4.5; la Industria 4.0 no se reduce exclusivamente a los cuatro puntos recién citados, pues es mucho más que eso. La Industria 4.0 es consistente con la llamada Cuarta Revolución Industrial, enfatizando y acentuando la idea de una creciente y adecuada digitalización y coordinación cooperativa en todas las unidades productivas de la economía.

Apoyados en este nuevo concepto a nivel global el software de simulación en todos los ámbitos industriales juega un gran papel muy importante ya que ayuda a realizar análisis predictivos de tiempos y situaciones reales en ambientes virtuales.

El software de simulación y diseño de circuitos electrónicos brinda a los ingenieros habilidades avanzadas de análisis y diseño para optimizar el rendimiento, reducir los errores de diseño y acortar el tiempo para generar prototipos. Las herramientas intuitivas resultan en significativos ahorros en costo en el desarrollo de estos prototipos.

Existe un gran número de software de simulación de circuitos electrónicos, dentro de los más conocidos se encuentran KiCad, Altium, OrCad, Multisim y Proteus, entre otros, esta práctica servirá de apoyo para introducir a los alumnos a este mundo virtual.

Para poder comenzar es necesario tener ciertos conocimientos de componentes electrónicos básicos que nos apoyaran en el desarrollo de esta práctica.

## Actividades previas a la práctica

- 1) El alumno realizará la lectura de la práctica.
- 2) Investigue e imprima los códigos para lectura de valores de resistencias y las tablas de verdad de los circuitos 74LS04 y 74LS181 y llevarlas a la práctica.
- 3) Realice el análisis teórico de los circuitos de las figuras 1.4 y 1.8 de la práctica obteniendo los voltajes y corrientes.

## Equipo

1 lap-top o computadora con software de simulación instalado previamente.

## Material

Tabla de verdad Impresa de los circuitos 74LS04 Y 74LS181.

## Procedimiento experimental

1. Desarrolle el primer proyecto para conocer el ambiente de programación siguiendo los siguientes pasos. Seleccionar la opción "Schematic Capture" que se indica en la figura 1.1.



Figura 1.1. Vista de Inicio

2. En la figura 1.2 se presenta el área de donde se pueden colocar los componentes, además se cuenta con las herramientas de edición y simulación.
3. Es posible hacer *zoom in* y *zoom out* al área de trabajo por medio de la rueda del mouse o mover el área de trabajo presionando el botón integrado a la rueda del mouse y sin soltarlo, arrastrar el área de trabajo.

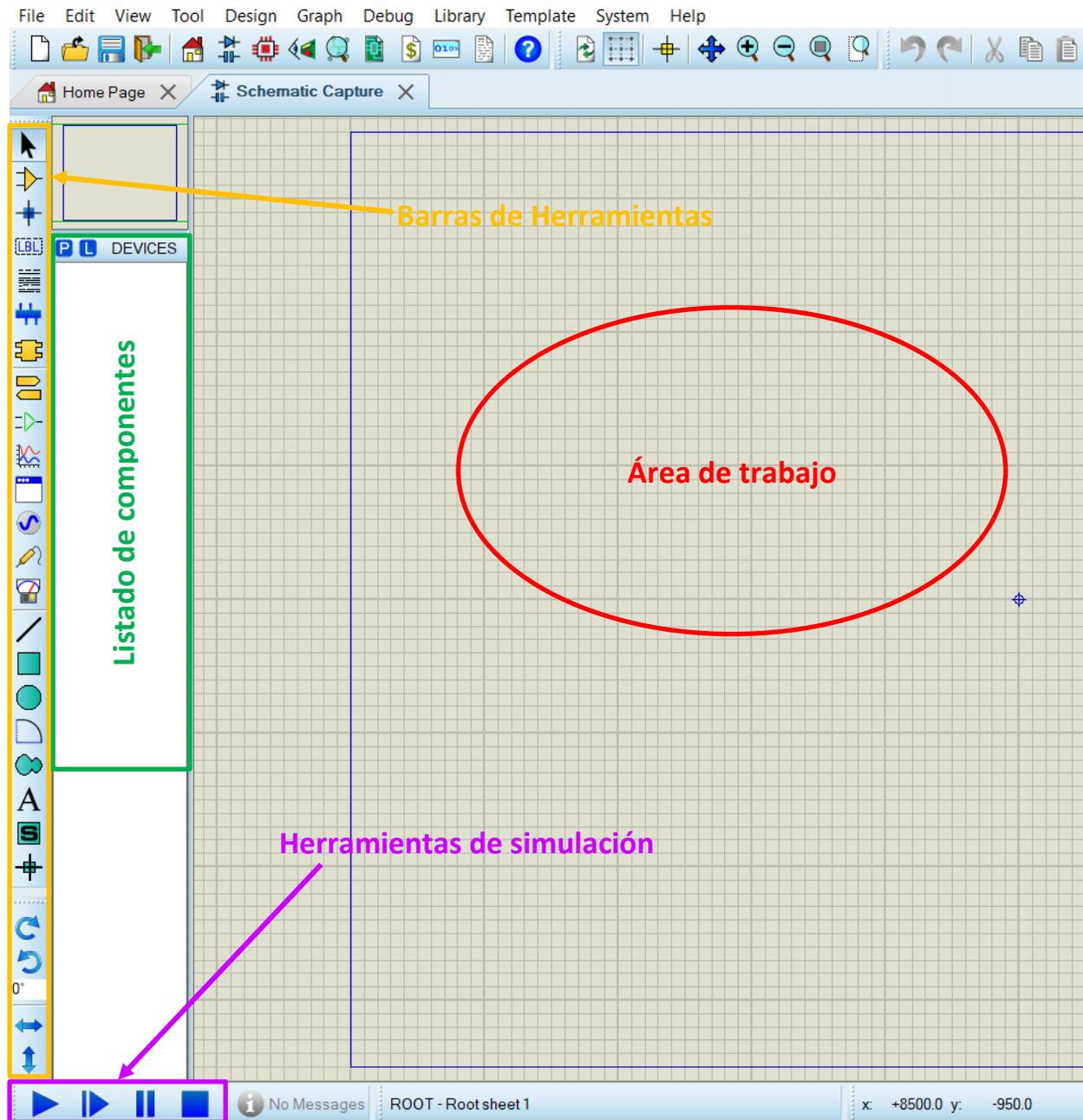


Figura 1.2. Ambiente de trabajo.

4. En el listado de componentes, que se muestra en la figura 1.2, identifique el botón marcado con la letra “P” (*Pick Devices*) Para abrir la ventana del mismo nombre.
5. A la izquierda de la ventana, en la esquina superior aparece el campo **Keywords**, el cual permite buscar los componentes que se desean agregar al proyecto haciendo doble clic, ya sea circuitos integrados, elementos pasivos, distintos tipos de fuentes, etc. En la figura 1.3 se ilustra la búsqueda de un elemento pasivo como puede ser una resistencia usando la partícula “res”. En la parte derecha se muestra la vista previa del elemento y se indica si tiene modelo de simulación, si aparece el mensaje “no simulation model” entonces no es posible simularlo.

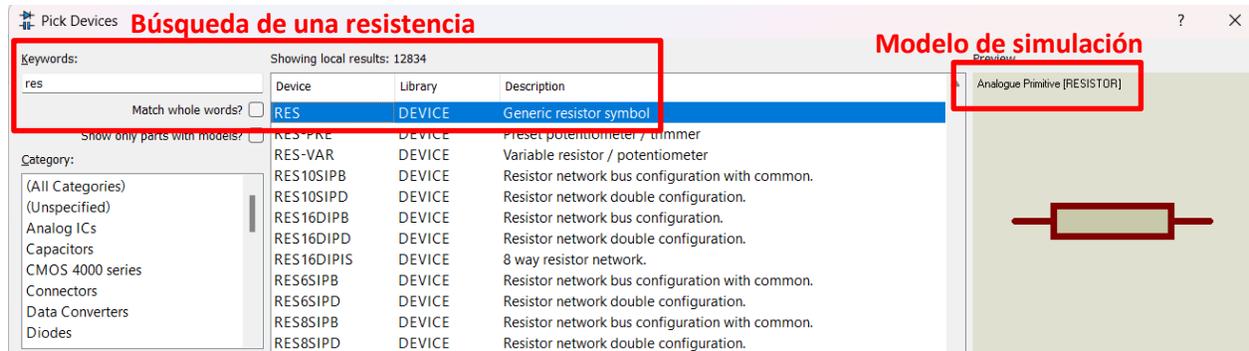


Figura 1.3. Biblioteca de componentes y selección de elementos.

- Arme el circuito mostrado en la figura 1.4. La fuente de alimentación y la tierra se pueden encontrar en la barra de herramientas en el botón "Terminal Mode"  indicados como **Power** y **Ground**, respectivamente.

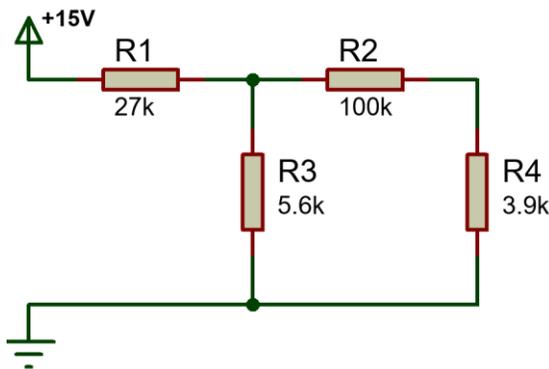


Figura 1.4. Primer circuito de prueba.

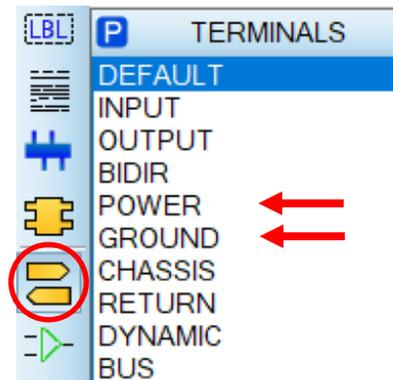


Figura 1.5. Menú "Terminals Mode".

- Para ajustar los valores de los elementos solo es necesario hacer doble clic en cada uno, tanto las resistencias como la fuente de alimentación. En el caso de la fuente se debe indicar que el signo del voltaje de alimentación, en este caso **+15V**. Esto último se observa en la figura 1.6.

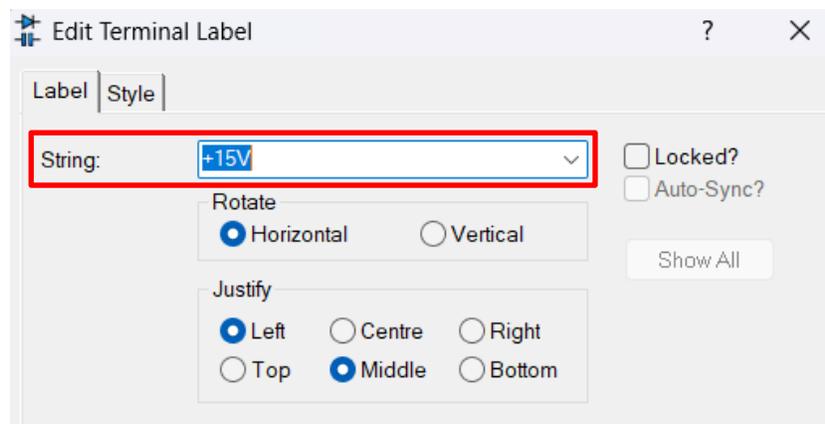


Figura 1.6. Ventana de propiedades de una resistencia.

- Agregue los elementos llamados "Voltaje Probe" (Sonda de Voltaje), que se encuentran en la barra de herramientas en el botón "ProbeMode" . En la figura 1.7 se muestra la forma de colocar las puntas de voltaje para realizar una medición de voltaje de CD.

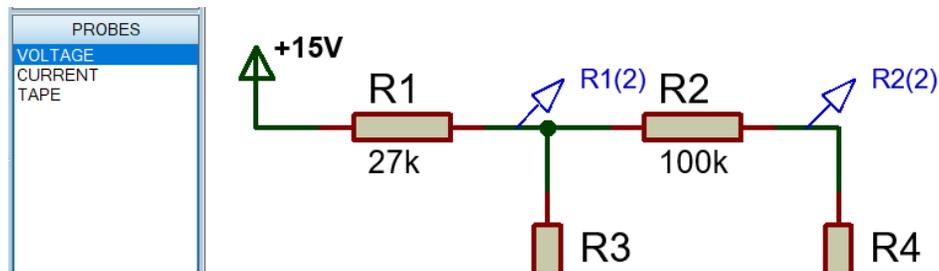


Figura 1.7. Sondas para la medición de voltaje de CD.

- Para iniciar la simulación del circuito, pausarla o detenerla puede usar los botones correspondientes en las herramientas de simulación, como se observa en la figura 1.2.
- Realice la simulación del circuito de la figura 1.4 y anote los valores de voltaje indicados por las sondas y compruebe si los cálculos de las actividades previas coinciden con la medición.
- Arme un nuevo circuito como el mostrado en la figura 1.8 y realice la simulación para obtener los voltajes que se piden en la tabla 1.1 para los valores de resistencia del potenciómetro. El elemento del potenciómetro lo puede buscar en el menú de dispositivos, botón "P" con el nombre de POT-HG. Si desea girar las sondas de prueba puede hacer uso de las herramientas que están justo arriba de las herramientas de simulación.

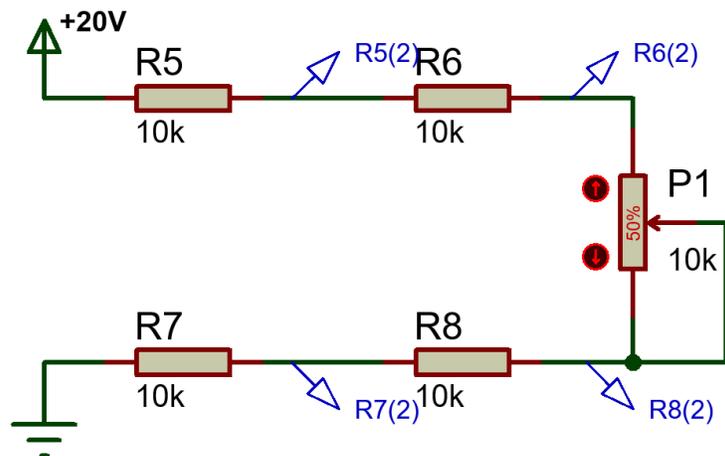


Figura 1.8. Circuito Serie.

- Ajuste el valor del potenciómetro en su ventana de propiedades a  $10k\Omega$  y, durante la simulación, es posible cambiar el valor resistivo del potenciómetro empleando las flechas rojas que tiene a un lado, en el caso de la figura 1.8 indica que esta al 50%, eso quiere decir que tiene un valor de resistencia de  $5k\Omega$  en ese momento.

- Comience la simulación con el botón correspondiente de la barra de herramientas y, cambiando el valor del potenciómetro, llene la tabla 1.1 utilizando las sondas de medición.

Tabla 1.1. Medición de voltaje

| Pot  | Voltaje 1 | Voltaje 2 | Voltaje 3 | Voltaje 4 |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0%   |           |           |           |           |
| 15%  |           |           |           |           |
| 35%  |           |           |           |           |
| 70%  |           |           |           |           |
| 80%  |           |           |           |           |
| 100% |           |           |           |           |

- Modifique el circuito de la figura 1.8, eliminando las sondas de voltaje de CD y sustituyendo la entrada de Voltaje de CD (**Power**) por una fuente de señal Senoidal del botón "Generator Mode" eligiendo la opción llamada **SINE**, como se muestra en la figura 1.9.

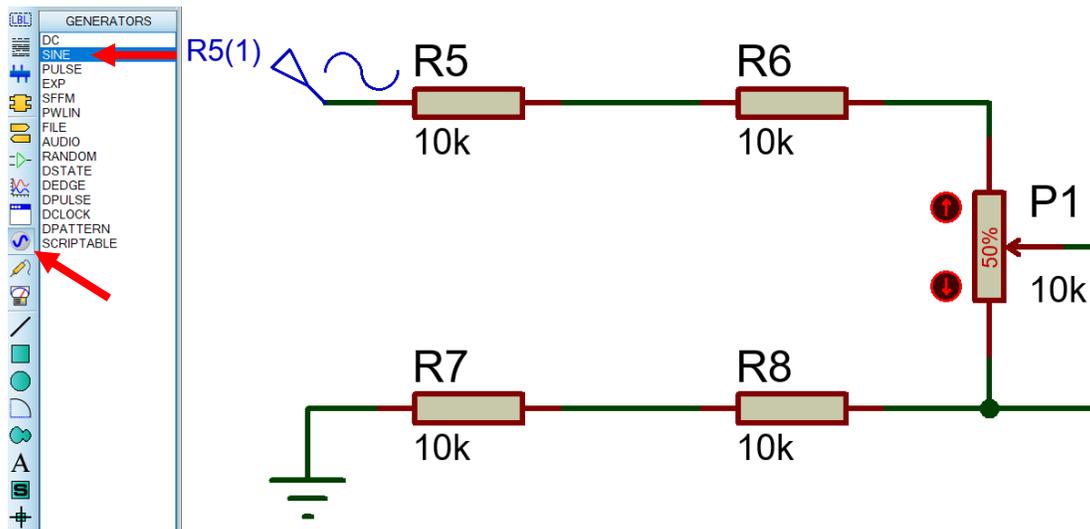


Figura 1.9. Circuito modificado.

- Abra la ventana de propiedades del **Generador de onda senoidal** y ajústelo con una señal senoidal de amplitud 2V, una frecuencia de 1kHz y offset de 0V<sub>CD</sub>, como se ve en la figura 1.10.
- Agregue al diseño un osciloscopio para observar las señales senoidales dentro del circuito. La figura 1.11 muestra el osciloscopio que puede obtenerse del botón "Virtual Instrument Mode" como **OSCILLOSCOPE**. Cada una de las terminales corresponde a un canal distinto del osciloscopio y la ventana del osciloscopio se abrirá automáticamente al iniciarla simulación y se cerrará al detener la simulación. NO CIERRE la ventana del osciloscopio directamente.
- En caso de cerrar accidentalmente la ventana del osciloscopio de forma manual, para poder volver a abrirla es necesario dirigirse al menú **Debug** y seleccionar la opción **Digital Oscilloscope**.

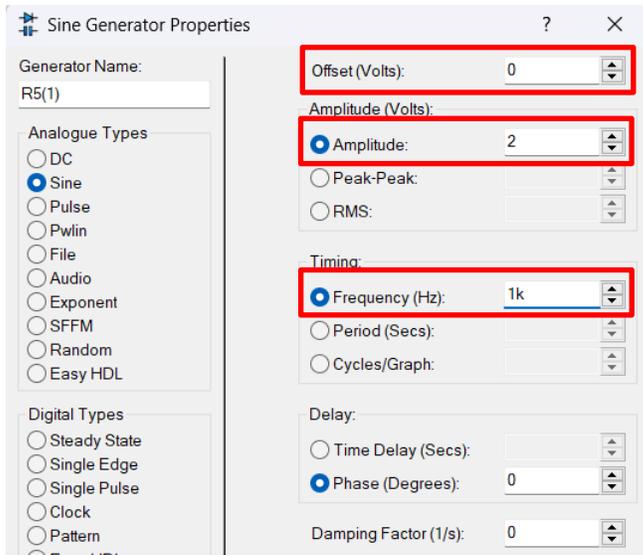


Figura 1.10. Calibración del generador de señales senoidales.

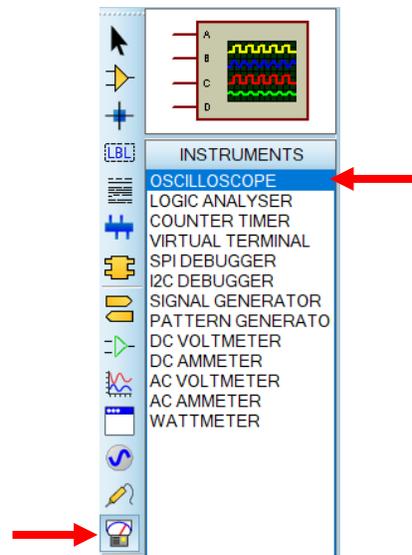


Figura 1.11. Virtual Instrument Mode.

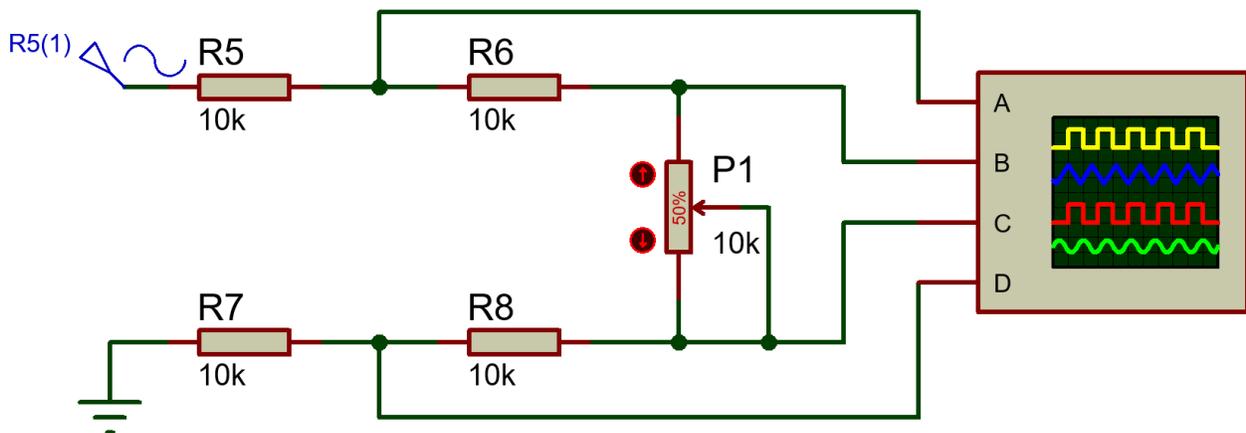


Figura 1.12. Conexión del osciloscopio dentro del simulador.

18. Inicie la simulación con el generador senoidal y el osciloscopio. Anote sus comentarios de lo observado y grafique las señales de los canales de medición de voltaje 1 al 4 utilizando el osciloscopio virtual. Asegúrese que todos los canales estén ajustados para trabajar en acoplo de CA, que la escala de voltaje de cada canal este en 1V/div y que la escala de tiempo sea 0.5ms/div, como se observa en la figura 1.13.

19. Modifique el valor de las resistencias como se indica a continuación en el circuito de la figura 1.12, observe y grafique las señales V1, V2, V3 y V4 acotándolas correctamente.

- R<sub>5</sub> por una resistencia R<sub>5</sub>=4.7kΩ
- R<sub>6</sub> por una resistencia R<sub>6</sub>=5.6kΩ
- R<sub>7</sub> por una resistencia R<sub>7</sub>=3.9kΩ
- R<sub>8</sub> por una resistencia R<sub>8</sub>=1.2kΩ

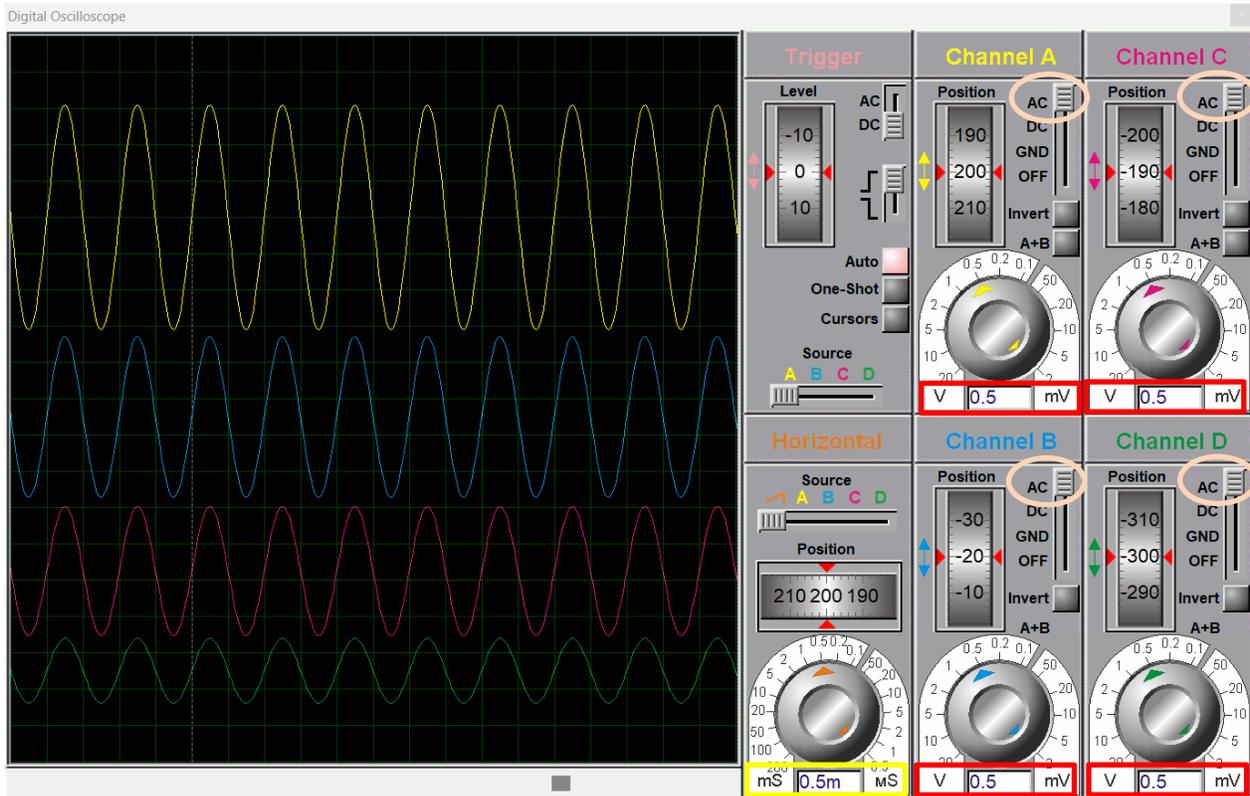


Figura 1.13. Ventana del osciloscopio dentro del simulador.

20. Armar el circuito de la figura 1.14, utilizando los siguientes componentes buscándolos en el menú de dispositivos (botón *P*) y agregarlos al listado de componentes.

- 74LS04
- 74LS181
- Led-yellow
- Logicstate

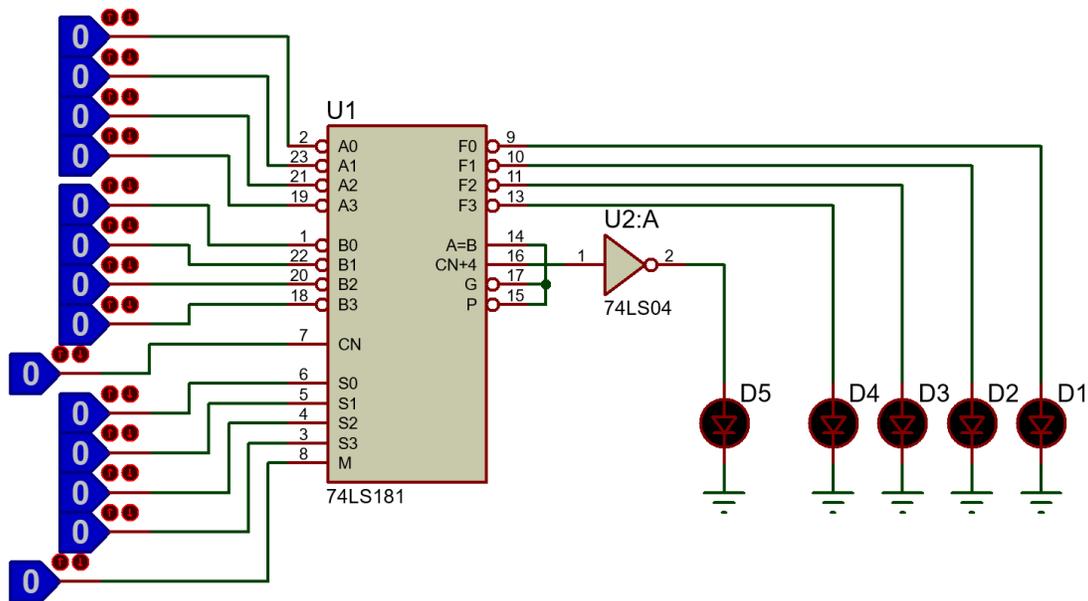


Figura 1.14. Simulación de circuitos digitales.

21. Comprobar al menos 5 operaciones del CI 74LS181, llenando una tabla y anotando sus comentarios.

## **Cuestionario.**

- 1) Con que dispositivo podemos medir la corriente en un circuito electrónico en el software de simulación Proteus.
- 2) ¿Por qué se debe de usar el acoplo de CA en el osciloscopio durante la práctica y qué error se produce si se usa acoplo de CD?
- 3) ¿En qué librerías se encuentran los circuitos integrados LM741 y TIMER 555?

## **Conclusiones**

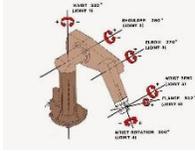
Elabore un resumen que muestre las conclusiones a las que haya llegado después de realizar todas las actividades de esta práctica.

## **Bibliografía**

Elabore una lista de las referencias bibliográficas consultadas.

## Laboratorio de Teoría de Control y Robótica

### Práctica 2 Detección mediante sensores



## Temas

- 7.1. Sensores de posición y de velocidad.
- 7.5. Sensores de temperatura.

## Objetivos

Al término de esta práctica el alumno podrá:

- El alumno conocerá el funcionamiento y uso de diversos tipos de sensores.
- Aprenderá la forma en la que los sensores interactúan con el entorno y como estas interacciones pueden servir como medio de control de un robot.

## Introducción

Existe una gran cantidad de sensores en el mercado, cada uno de ellos tiene la finalidad de poder detectar distintas magnitudes físicas o químicas del exterior (temperatura, humedad, luz, presencia, distancia, elementos corrosivos, entre otras), llamadas variables, y transformarlas en variables que podamos captar, cuantificar y manipular, generalmente eléctricas, señales que a su vez puedan ser utilizadas por instrumentos de control y de diseño.



Figura 2.1. Distintos tipos de sensores.

Los sensores son una parte de gran importancia para la robótica moderna, debido a que son estos elementos los que se encargan de que un robot pueda interactuar con su entorno, y como resultado de esta interacción, pueden responder a cada una de las variaciones físicas ocurridas a su alrededor.

Los sensores no solo tienen aplicaciones dentro de la robótica, cualquier rama tecnológica o ingenieril puede hacer usos de estos elementos, tales como: sistemas de control de accesos, sistemas de riego automatizado, sistemas aeroespaciales, sistemas de control vehicular, sistemas inteligentes y mucho otros más.

## Actividades previas a la práctica

- 1) El alumno realizará la lectura de la práctica.
- 2) Investigar información de diversos sensores, su funcionamiento básico, y al menos una aplicación específica.
- 3) El alumno deberá traer impresas las hojas técnicas del sensor de fuerza resistivo FSR.
- 4) De acuerdo con las hojas de especificaciones de los elementos utilizados en la práctica, el alumno calculará los valores de operación de los circuitos a realizar.
- 5) Investigue las formas de conexión conocidas como *pull-up* y *pull-down* empleadas en los circuitos digitales y explique su funcionamiento.

## Equipo

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

## Material

- 1 LDR de  $2M\Omega$
- 1 Resistencia  $10\text{ k}\Omega$
- 1 Resistencia  $68\text{ k}\Omega$
- 1 Resistencia de  $1K\Omega$
- 1 Resistencia  $330\Omega$
- 1 Potenciómetro de  $10\text{ k}\Omega$
- 1 Fotodiodo IR333C
- 1 Diodo LED
- 1 Fototransistor PT331C
- 1 LM35
- 1 LM741

Tableta de conexiones (protoboard)  
Alambres para conexiones calibre 20 0 22  
Cables banana-caimán y caimán- caimán

**NOTA:** Esta prohibido el uso de jumpers para las conexiones del circuito.

## Procedimiento experimental

1. Con el multímetro, mida la resistencia del LDR a exposición de luz ambiente. Registre el valor.
2. Colocar el LDR frente a una fuente de luz. Poco a poco vaya limitando la luz que recibe el LDR hasta llegar a un bloqueo total lumínico. Observe con el multímetro la variación resistiva desde la exposición lumínica más alta hasta la mínima. Registre los valores máximo y mínimo.
3. Conecte el circuito de la figura 2.2 y mida el voltaje de salida.

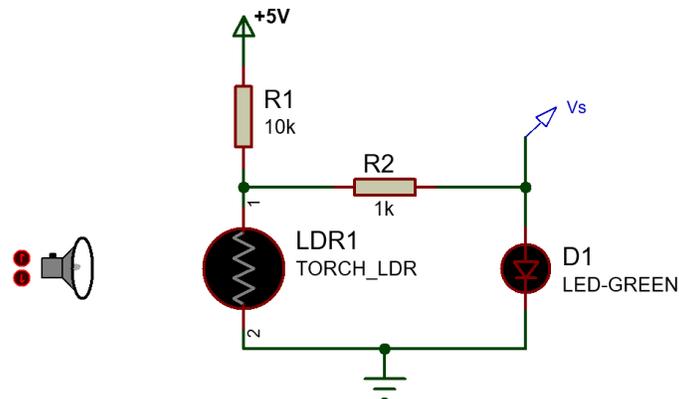


Figura 2.2. Circuito sensor de luminosidad.

4. Colocar el LDR frente a una fuente de luz. Poco a poco vaya limitando la luz que recibe el LDR hasta llegar a un bloqueo total lumínico. Vaya observando con el multímetro la variación del voltaje desde la exposición lumínica más alta hasta la mínima. Registre los valores máximo y mínimo.
5. Intercambie las posiciones de las resistencias en la forma mostrada en la figura 2.3 y mida nuevamente el voltaje de salida.

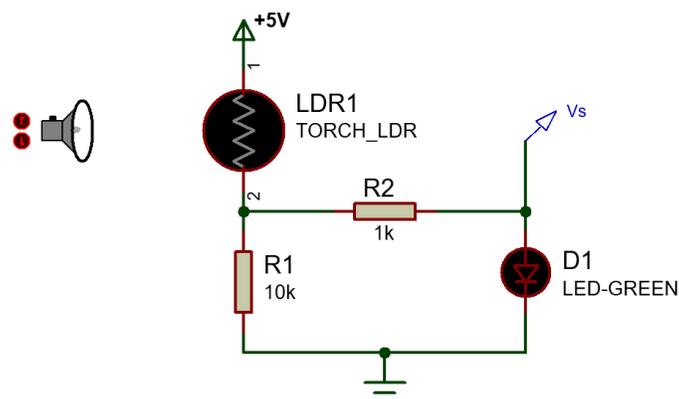


Figura 2.3. Circuito sensor con elementos intercambiados.

6. Repita el punto 4 del procedimiento para el circuito de la figura 2.3.
7. Arme el circuito de la figura 2.4, colocando los elementos ópticos a unos 5 cm de distancia entre ellos y cuidando que el diodo emisor quede apuntando directamente hacia el fototransistor. Mida el voltaje de salida.
8. Coloque y quite un obstáculo entre el diodo emisor y el fototransistor repetidamente. Mida los voltajes de salida con ayuda del multímetro y observe lo que sucede.

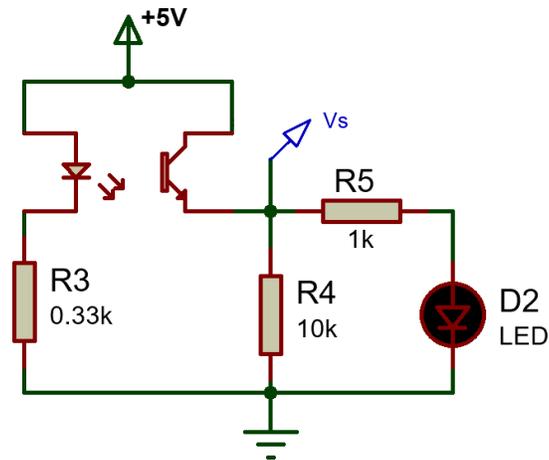


Figura 2.4. Circuito de detección de presencia.

9. Arme el circuito de la figura 2.5, empleando el sensor LM35.

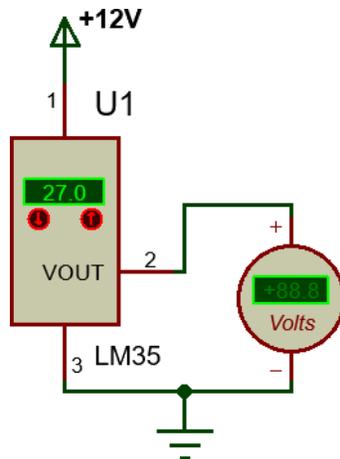
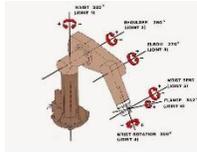


Figura 2.5. Circuito con sensor de temperatura.

10. Por medio del multímetro, mida el voltaje de salida del circuito, coloque calor al elemento LM35 y mida la variación de voltaje en la salida (terminal 2), anote los valores obtenidos.
11. Arme el circuito mostrado en la figura 2.6.
12. Mueva el potenciómetro en aproximadamente 4K con respecto a tierra, mida los voltajes en V3 y en V2. Coloque una fuente de calor en el elemento LM35, vaya observando el cambio en el voltaje V1, y observe el resultado en V2. ¿En qué momento el LED D1 se enciende?





## Laboratorio de Teoría de Control y Robótica

### Práctica 3

#### Modelado de sistemas con amplificadores operacionales



## Tema

### 1.1. Definiciones.

## Objetivos

Al término de esta práctica el alumno podrá realizar:

- El modelado de sistemas físicos por medio de circuitos con amplificadores operacionales.
- Comprobar los resultados teóricos mediante la implementación y prueba de los circuitos armados.

## Introducción

Los amplificadores operacionales son dispositivos electrónicos que amplifican señales de voltaje, también son llamados operacionales ya que pueden realizar algunas operaciones sobre las señales de entrada como: sumar, derivar, integrar, invertir, comparar, etc.

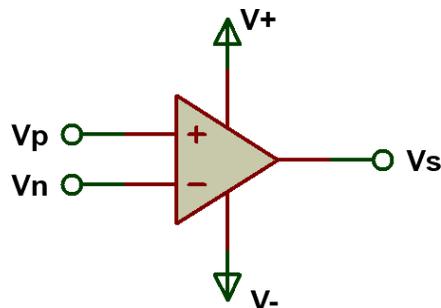


Figura 3.1. Símbolo de un amplificador operacional ideal.

El amplificador operacional tiene las siguientes características:

- ❖ Alta impedancia de entrada ( $z_i \rightarrow \infty$ ). Hace que la corriente de entrada sea muy cercana a cero y por lo tanto despreciable en el análisis de mallas.
- ❖ Baja impedancia de salida ( $z_o \rightarrow 0$ ). Hace que la salida de voltaje no se vea afectada por la carga pues funciona como una fuente de voltaje ideal sin limitantes de corriente.
- ❖ Ganancia sin realimentación que tiende a infinito para frecuencias bajas alrededor de 10 Hz, y ganancia cercana a uno cuando la frecuencia es mayor a 1MHz
- ❖ Entrada inversora, si se conecta la señal de entrada aquí la señal de salida estará invertida

- ❖ Entrada no inversora, si la señal de entrada se conecta aquí, la señal de salida estar en fase con la de entrada

La ecuación característica del amplificador operacional es:  $V_o = K(V_P - V_N)$  donde  $V_o$  es el voltaje de salida,  $V_P$  es el voltaje en la entrada positiva,  $V_N$  es el voltaje en la entrada negativa y  $K$  es la ganancia. Aquí se asumirán las características de un amplificador operacional ideal y, por la ganancia tan grande que tiene, deberá de tener una realimentación negativa (de la salida del operacional a la entrada inversora) para volverlo estable. Esto brinda un gran abanico de posibilidades, pues modificando su función de transferencia permite crear los diferentes circuitos de los que se componen los diagramas de bloques.

*Amplificador inversor*, se muestra en la figura 3.2 su ecuación característica es:

$$V_s = -\frac{R_2}{R_1} V_e$$

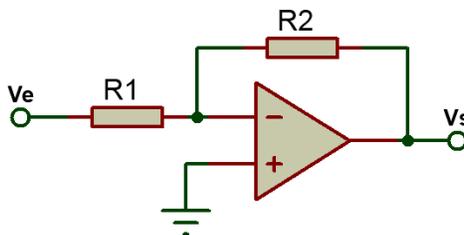


Figura 3.2. Diagrama de un amplificador inversor.

*Amplificador no inversor*, se puede observar en la figura 3.3 que la entrada negativa se conecta a tierra a través de una resistencia y su ecuación característica es:

$$V_s = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_e$$

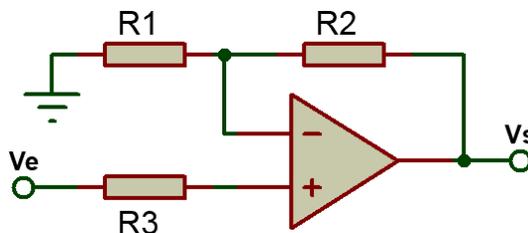


Figura 3.3. Diagrama de un amplificador no inversor.

*Amplificador sumador inversor*, uno de los circuitos más útiles, se muestra en la figura 3.4 un sumador de tres entradas, el cual permite sumar algebraicamente tres voltajes de entrada diferentes, cada uno multiplicado por un factor de ganancia como indica su ecuación característica:

$$V_s = -\left(\frac{R}{R_1} V_1 + \frac{R}{R_2} V_2 + \frac{R}{R_3} V_3\right)$$

$$\text{Si } R_1 = R_2 = R_3$$

$$V_s = -\frac{R}{R_1} (V_1 + V_2 + V_3)$$

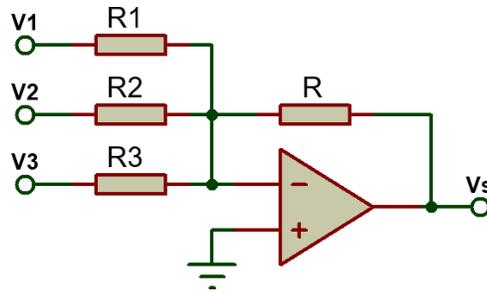


Figura 3.4. Diagrama de un amplificador sumador inversor.

El *amplificador restador* de la figura 3.5 generalmente se emplea en instrumentación y aplicaciones industriales para amplificar la diferencia entre dos señales de entrada. La ecuación característica de éste amplificador puede simplificarse como se ve a continuación:

$$V_s = \left( \frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4} \cdot \frac{R_4}{R_1} \right) V_2 - \left( \frac{R_2}{R_1} \right) V_1$$

Si  $R_1 = R_2$  y  $R_3 = R_4$

$$V_s = \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1)$$

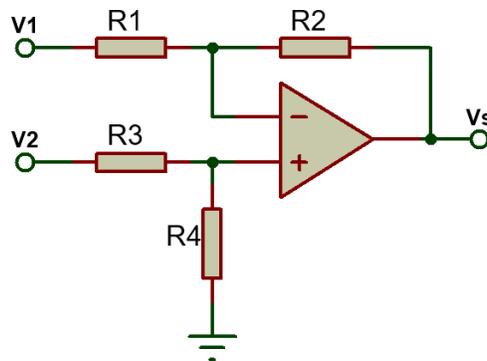


Figura 3.5. Diagrama de un amplificador restador.

Un *amplificador Integrador*, como el de la figura 3.6, es una modificación del amplificador inversor cambiando la resistencia de realimentación  $R_2$  por un capacitor, su ecuación característica es:

$$V_s = -\frac{1}{R_1 C} \int V_e(t) dt$$

En el dominio de Laplace:

$$V_{out} = -\frac{1}{R_1 C s} V_{in}$$

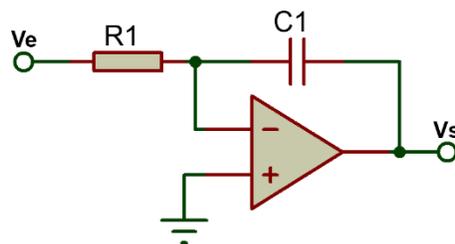


Figura 3.6. Diagrama de un amplificador integrador.

Para mejorar la respuesta del amplificador integrador y la estabilidad del mismo se puede agregar una resistencia en paralelo con el capacitor de realimentación para limitar la ganancia en baja frecuencia, como se observa en la figura 3.7. El cambio producido su ecuación característica se muestra a continuación:

$$V_{out} = -\left(\frac{R_2}{R_1}\right)\left(\frac{1}{R_2 C_1 s + 1}\right)V_{in}$$

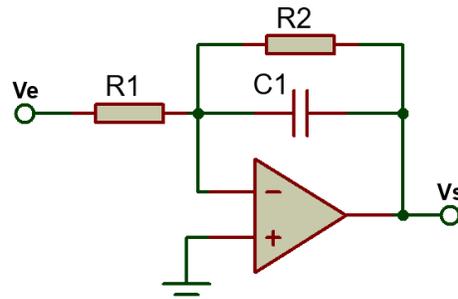


Figura 3.7. Diagrama de un amplificador integrador con resistencia de limitación.

El amplificador derivador emplea los mismos elementos de un integrador, únicamente intercambiándolos de posición como se ve en la figura 3.8, su ecuación característica es:

$$V_{out} = -R_1 C_1 s V_{in}$$

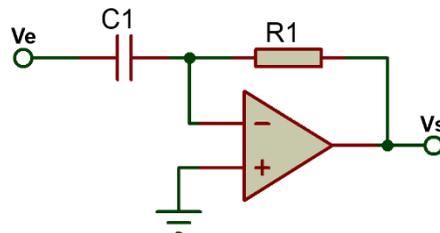


Figura 3.8. Diagrama de un amplificador derivador.

De manera similar al amplificador integrador, se puede mejorar la respuesta del amplificador derivador agregando una resistencia en serie con el capacitor de entrada. La nueva ecuación característica es la siguiente y la figura 3.9 muestra el circuito.

$$V_{out} = -\left(\frac{R_1 C_1 s}{R C_1 s + 1}\right)V_{in}$$

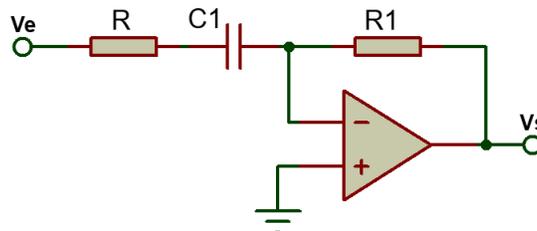


Figura 3.9. Diagrama de un amplificador derivador con resistencia de limitación.

En la práctica se comprobará el funcionamiento del amplificador operacional en sus diferentes configuraciones.

---

## Actividades previas a la práctica

- 1) El alumno realizará la lectura de la práctica.
- 2) Investigue e imprima la hoja técnica del circuito LM741 teniendo especial interés en el diagrama de terminales.
- 3) Analice los circuitos 3.10, 3.11, 3.12 y 3.13 de la práctica desarrollando sus ecuaciones de funcionamiento, incluyendo también las modificaciones indicadas en el procedimiento, y obtenga la ganancia teórica correspondiente a cada uno. Entréguelo de acuerdo con las indicaciones que haya dado su profesor
- 4) Realice la simulación de cada uno de los circuitos de la práctica siguiendo el procedimiento experimental. Guarde la simulación y entregue una copia impresa o en formato electrónico de los resultados de acuerdo con lo indicado por el profesor.

## Equipo

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

## Material

- 2 Amplificadores operacionales LM741
  - 4 Resistencias de 10 k $\Omega$ , ½ watt
  - 1 Resistencia de 5.6 k $\Omega$ , ½ watt
  - 1 Resistencia de 1 k $\Omega$ , ½ watt
  - 1 Capacitor de 10 nF
  - 1 Capacitor de 0.1  $\mu$ F
  - 1 Potenciómetro de 50 k $\Omega$
  - Tableta de conexiones (protoboard)
  - Alambres para conexiones calibre 20 0 22
  - Cables banana-caimán y caimán- caimán
- NOTA:** Está prohibido el uso de jumpers para las conexiones del circuito.

## Procedimiento experimental

1. Arme el circuito mostrado en la figura 3.10 polarizando el circuito con  $\pm 10V_{CD}$  en las terminales V+ y V-.

- Calibre el generador de funciones para obtener a su salida una señal de  $2 \sin 6283.18 t$  y conéctelo en el punto  $V_e$ , como se indica en la figura 3.10.

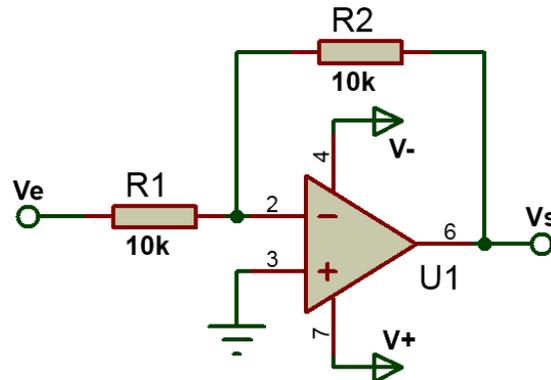


Figura 3.10. Circuito amplificador inversor.

- Con ayuda del osciloscopio en acoplo de CA, observe y grafique las señales de entrada  $V_e$  y de salida  $V_s$  acotándolas correctamente.
- Sustituya la resistencia  $R_2$  por una resistencia  $R_3=5.6k\Omega$  en el circuito de la figura 3.10 y observe y grafique las señales de entrada  $V_e$  y de salida  $V_s$  acotándolas correctamente.
- Anote sus comentarios acerca de la ganancia y la fase de las señales obtenidas del circuito de la figura 3.10 y como se ven afectadas al sustituir  $R_2$  por  $R_3$ .
- Modifique el circuito anterior para obtener el que se muestra en la figura 3.11. No olvide conectar la señal del generador de funciones, que fue calibrada al principio de la práctica, en el punto  $V_e$  y los voltajes de polarización.
- Conecte los canales del osciloscopio en los puntos  $V_e$  y  $V_s$  del circuito de la figura 3.11 y observe ambas señales. Grafique ambas señales y acótelas correctamente.
- Anote sus comentarios acerca de la ganancia y la fase de las señales presentes en el circuito de la figura 3.11.

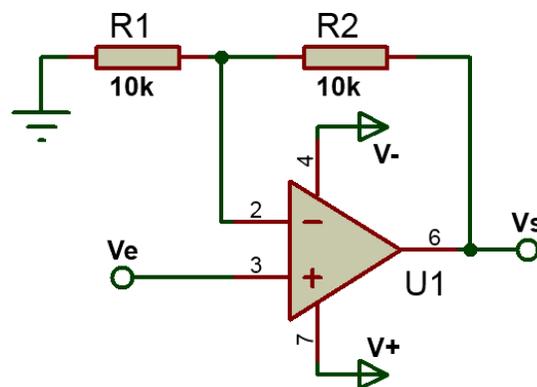


Figura 3.11. Circuito amplificador no inversor.

9. Arme el circuito amplificador derivador de la figura 3.12 teniendo cuidado de conectar los voltajes de polarización en las terminales indicadas e inserte una señal  $V_e = 1 \sin 6283.18 t \text{ V}$  en el punto de entrada.
10. Graficar y acotar las señales de entrada  $V_e$  y de salida  $V_s$  correspondientes, repita esto mismo cambiando la forma de la señal de entrada a una señal triangular y una señal cuadrada.

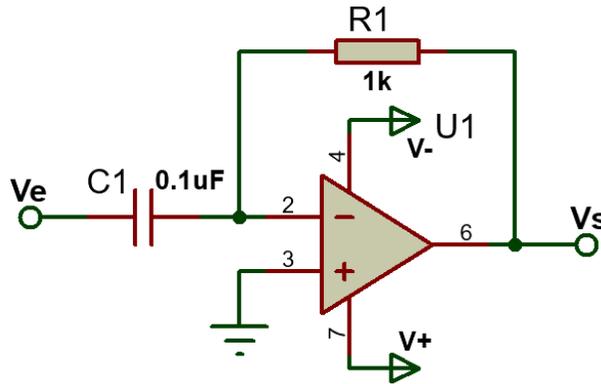


Figura 3.12. Circuito amplificador derivador.

11. Arme el circuito amplificador integrador mostrado en la figura 3.13 teniendo cuidado de conectar los voltajes de polarización en las terminales indicadas.
12. Utilizando el generador de funciones, inserte una señal  $V_e = 1 \sin 6283.18 t \text{ V}$  en el punto de entrada al circuito 3.13.
13. Aplique las tres formas de las señales de entrada que se usaron para el circuito anterior y grafique las señales  $V_e$  y  $V_s$  para cada caso acotándolas.

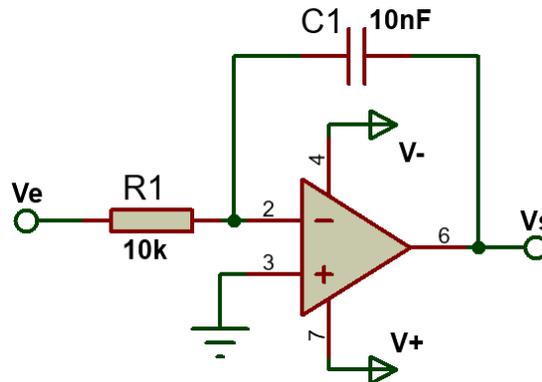


Figura 3.13. Circuito amplificador integrador.

14. Agregue el potenciómetro al amplificador integrador para obtener el circuito mostrado en la figura 3.14. Repita el punto 13 del procedimiento ajustando el potenciómetro para obtener la mayor amplitud con la menor distorsión posibles en la señal de salida.

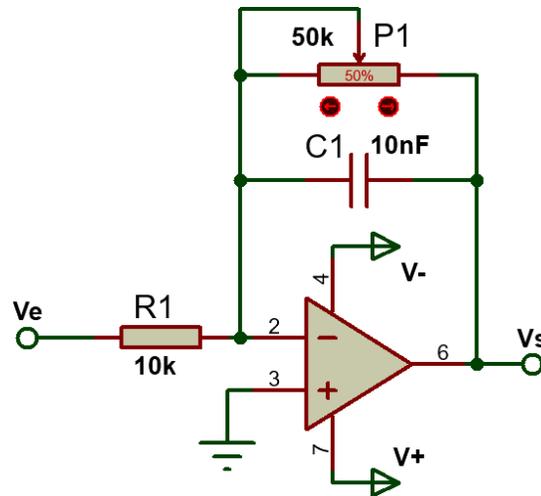


Figura 3.14. Circuito amplificador integrador con resistencia.

15. Anote sus comentarios acerca del comportamiento del amplificador integrador al variar el potenciómetro.
16. Remueva el potenciómetro para obtener nuevamente el circuito de la figura 3.13, arme el circuito de la figura 3.15 que está formado por el amplificador integrador y un amplificador sumador de dos entradas.
17. Usando una señal cuadrada con amplitud de 1V y frecuencia de 1kHz como entrada, observe con ayuda del osciloscopio la forma de onda a la salida del amplificador sumador.
18. Grafique las señales  $V_1$ ,  $V_2$  y  $V_s$  acotándolas en amplitud y frecuencia y anote sus observaciones sobre el funcionamiento del circuito.

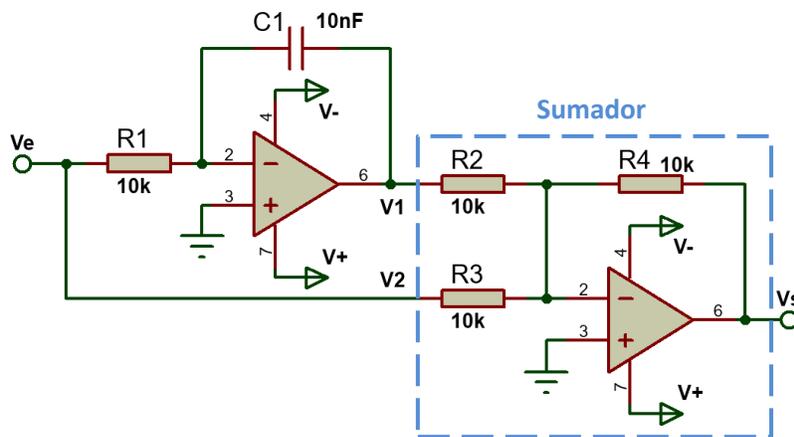


Figura 3.15. Circuito amplificador sumador de dos entradas.

19. Finalmente, arme el circuito amplificador restador mostrado en la figura 3.16 teniendo cuidado de conectar los voltajes de polarización en las terminales indicadas y usando una señal de entrada  $V_e = 2 \sin 6283.18 t$

20. Grafique las señales  $V_1$ ,  $V_2$  y  $V_s$  acotándolas en amplitud y frecuencia y anote sus observaciones sobre el funcionamiento del circuito.

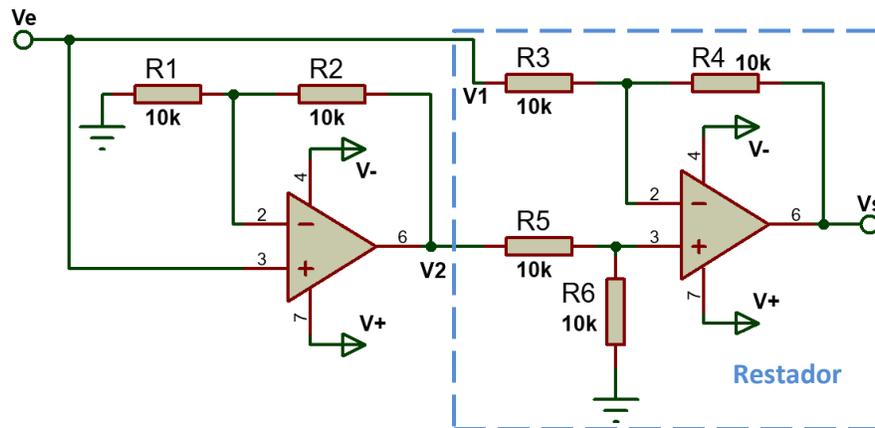


Figura 3.16. Circuito amplificador restador.

## Cuestionario.

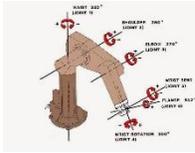
- 1) Empleando los voltajes pico a pico de las señales obtenidas experimentalmente, calcular la ganancia real de los circuitos 3.10, 3.11, 3.12 y 3.13 a través de la fórmula:  $\Delta v = -\frac{V_s}{V_e}$ . Para los circuitos donde se utiliza el capacitor, figuras 3.12 y 3.13, haga solo el análisis para las señales senoidales.
- 2) Demostrar que las ecuaciones características para los dos amplificadores integradores y los dos amplificadores derivadores mostrados en la introducción de la práctica son correctas.
- 3) A partir de las funciones de transferencia de los circuitos 3.12 y 3.13 comprobar en forma matemática las operaciones de integración y derivación en la ecuación que representa a cada una de las señales de entrada.
- 4) Explique detalladamente el funcionamiento de los circuitos 3.15 y 3.16 y calcule la ganancia teórica para cada uno.
- 5) Realice una tabla comparativa en donde se muestren la ganancia teórica y la ganancia real para cada uno de los circuitos de la práctica.

## Conclusiones

Elabore un resumen que muestre las conclusiones a las que haya llegado después de realizar todas las actividades de esta práctica.

## Bibliografía

Elabore una lista de las referencias bibliográficas consultadas.



## Laboratorio de Teoría de Control y Robótica

### Práctica 4

#### Respuesta en el tiempo de sistemas de 1º orden



## Tema

1.2 Estabilidad en los sistemas de control.

## Objetivos

Al término de esta práctica el alumno podrá realizar:

- Obtener la función de transferencia a partir de sistemas de primer orden implementado mediante componentes electrónicos.
- Comprobar el comportamiento de un sistema de primer orden al cambiar las resistencias que simulan la carga.
- Comprobar los resultados teóricos mediante la implementación y prueba de los circuitos armados.

## Introducción

Se denominan sistemas de primer orden a aquellos que quedan definidos por la siguiente relación:

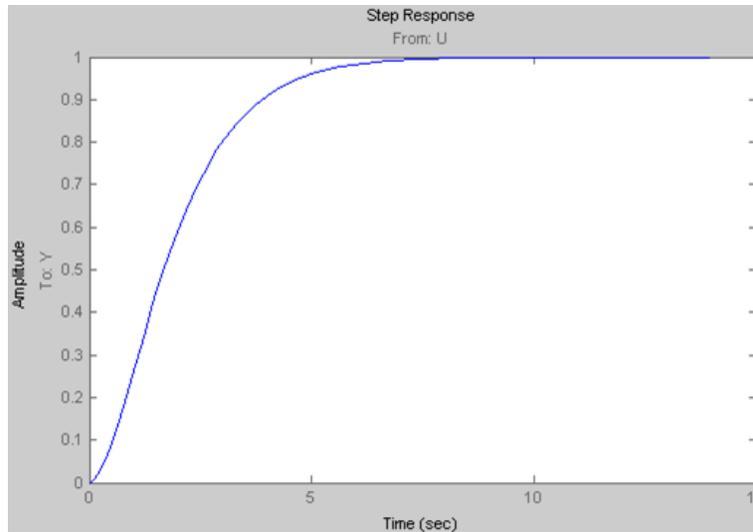
$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{\tau s + 1}$$

La cual consta de un solo polo en  $(-1/\tau)$ , es importante hacer notar que todos los sistemas que presentan la misma dinámica o función responden de la misma forma al excitarse con entradas similares.

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

$$C(t) = (1 - e^{-t/\tau})$$

Produciendo una respuesta exponencial decreciente, como la mostrada en la figura 4.1, que tiende hacia el valor escalón unitario, esta ecuación presenta dos partes: respuesta transitoria y respuesta permanente.



**Figura 4.1.** Respuesta en el tiempo de un sistema de primer orden.

## Actividades previas a la práctica

- 1) El alumno realizará la lectura de la práctica.
- 2) Partiendo de una función de transferencia de primer orden como la mostrada a continuación, determinar el diagrama de bloques que la representa.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{k}{s + p} = \frac{5}{s + 5}$$

- 3) Empleando herramientas computacionales, como puede ser ProgramCC u otro software similar, grafique la respuesta que corresponda a la función de transferencia de primer orden de la pregunta anterior para los tres valores de capacitancia empleados.
- 4) Realice la simulación del circuito de la práctica siguiendo el procedimiento experimental. Guarde la simulación y entregue una copia impresa o en formato electrónico de los resultados de acuerdo con lo indicado por el profesor.

## Equipo

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

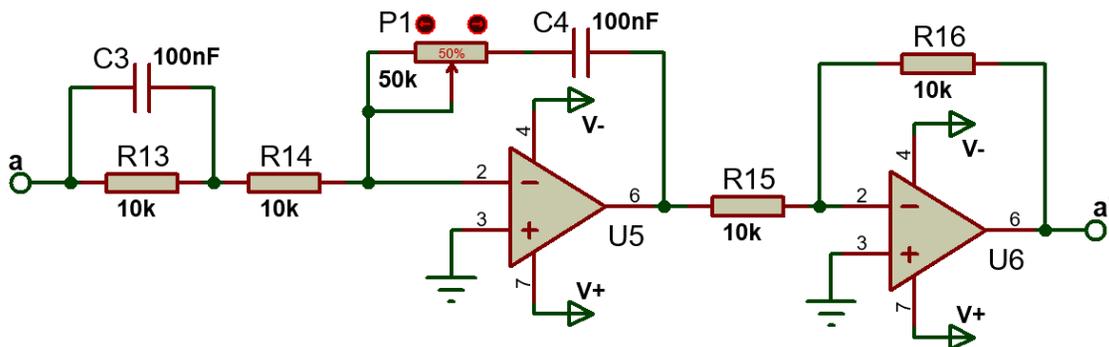
## Material

2 Amplificadores operacionales LM741  
 3 Resistencias de 10 k $\Omega$ , ½ watt  
 2 Resistencias de 47 k $\Omega$ , ½ watt  
 1 Capacitor de 10 nF  
 1 Capacitor de 15 nF  
 1 Capacitor de 22 nF  
 Tableta de conexiones (protoboard)  
 Alambres para conexiones calibre 20 0 22  
 Cables banana-caimán y caimán- caimán

**NOTA:** Está prohibido el uso de jumpers para las conexiones del circuito.

## Procedimiento experimental

1. Arme el circuito mostrado en la figura 4.2 polarizando el circuito con  $\pm 10V_{CD}$  en las terminales V+ y V-.
2. Calibre el generador de funciones para que proporcione una señal cuadrada de 4Vpp con un offset de 2V y frecuencia de 1.6kHz y conéctelo en el punto  $V_e$ , entrada escalón, como se indica en la figura 4.2.
3. Con ayuda del osciloscopio en acoplo de CD, observe y grafique las señales de entrada  $V_e$  y de salida  $V_s$  acotándolas correctamente.



**Figura 4.2.** Circuito que representa un sistema de primer orden.

4. Por medio de los cursores del osciloscopio, mida el tiempo que le toma a  $V_s$  alcanzar el 70% de su valor máximo y el tiempo total del estado transitorio.
5. Sustituya el capacitor del circuito de la figura 4.2 por el capacitor de 15 nF y repita los puntos 3 y 4 del procedimiento.
6. Cambie el capacitor por el de 22 nF en el circuito de la figura 4.2 y repita los puntos 3 y 4 del procedimiento.

7. Anote sus observaciones respecto de cómo afecta el cambio en el valor de capacitancia la respuesta del sistema.

## Cuestionario.

- 1) Para el circuito de la figura 4.2, describa detalladamente el funcionamiento de cada uno de los amplificadores operacionales.
- 2) Obtener la función de transferencia total del circuito de la figura 4.2, esto se puede lograr obteniendo la función de transferencia de cada uno de los amplificadores y multiplicándolas entre sí de la forma:

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{V_x}{V_e} \cdot \frac{V_s}{V_x}$$

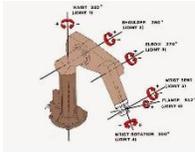
- 3) Compare las gráficas obtenidas por medio de herramientas computacionales con las gráficas experimentales, anote sus observaciones.

## Conclusiones

Elabore un resumen que muestre las conclusiones a las que haya llegado después de realizar todas las actividades de esta práctica.

## Bibliografía

Elabore una lista de las referencias bibliográficas consultadas.



## Laboratorio de Teoría de Control y Robótica

### Práctica 5

#### Respuesta en el tiempo de sistemas de 2º orden



## Tema

1.2 Estabilidad en los sistemas de control.

## Objetivos

Al término de esta práctica el alumno podrá realizar:

- Obtener la función de transferencia a partir de sistemas de primer y segundo orden implementado mediante componentes electrónicos.
- Comprobar los resultados teóricos mediante la implementación y prueba de los circuitos armados.

## Introducción

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

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

Donde:

$s = j\omega$  variable compleja de Laplace

$C(s)$  = variable de salida

$\omega_n$  = frecuencia natural no amortiguada

$R(s)$  = variable de entrada

$\xi$  = constante de amortiguamiento

Los sistemas de segundo orden presentan cuatro casos específicos:

- Críticamente Amortiguado ( $\xi=1$ ). No produce sobrepasos ni oscilaciones.
- Subamortiguado ( $0<\xi<1$ ). Tiene una respuesta transitoria oscilante que se extingue en un periodo determinado de tiempo, llamado de asentamiento.
- Sobreamortiguado ( $\xi>1$ ). Su respuesta es muy lenta y no tiene ningún sobrepaso.
- No amortiguado ( $\xi=0$ ). Tiene una respuesta oscilatoria permanente.

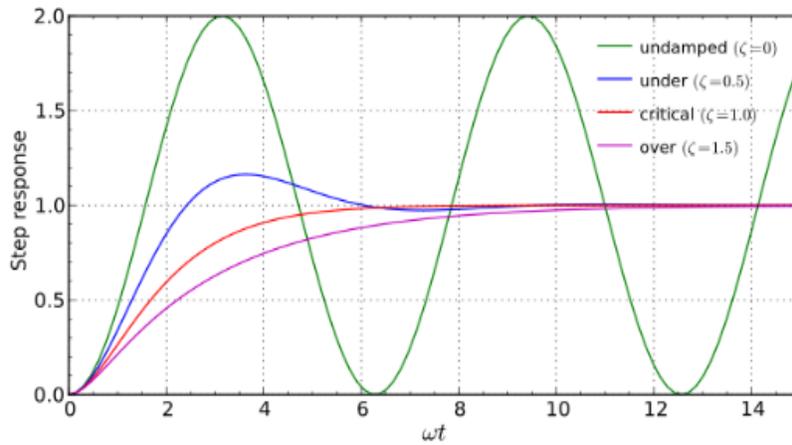


Figura 5.1. Respuesta en el tiempo de un sistema de segundo orden.

Se pueden definir todos los parámetros de un sistema de segundo orden a partir del tipo de respuesta correspondiente al caso amortiguado.

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} \qquad Mp = e^{\frac{-1}{\sqrt{1-\xi^2}}}$$

$$tr = \omega_d \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\omega_n} \qquad tr = -\frac{0.3rad}{\omega_n}$$

$$tp = \frac{1}{\omega_d} \qquad \theta_{rad} = \tan^{-1} \frac{\omega_d}{\omega_n}$$

$$ts(5\%) = \frac{3}{\omega_n} \qquad ts(2\%) = \frac{4}{\omega_n}$$

$$\tau = \omega_n$$

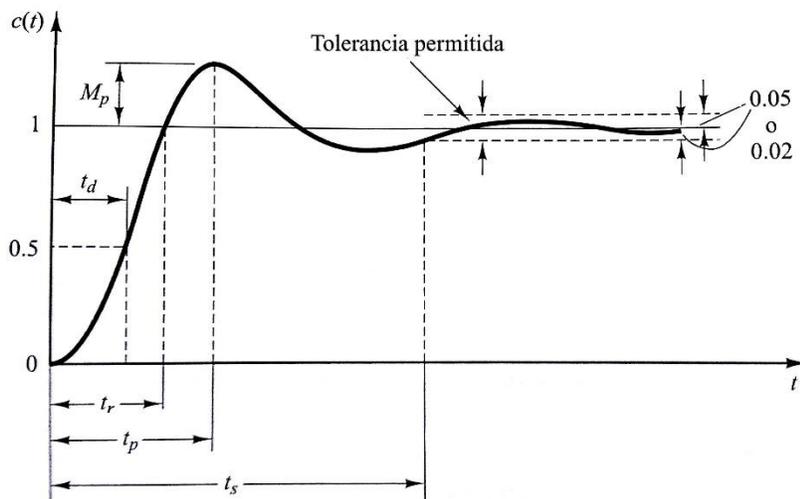
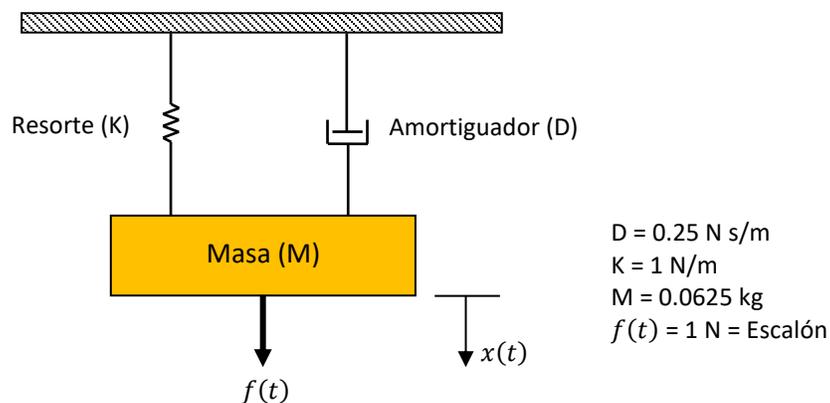


Figura 5.2. Parámetros de la respuesta en el tiempo de segundo orden.

## Actividades previas a la práctica

- 1) Considerando el diagrama de la figura 5.3, obtener su función de transferencia y dibujar el diagrama de bloques correspondiente.
- 2) Indicar a cuál de los cuatro casos de amortiguamiento corresponde el sistema de segundo orden de acuerdo a sus parámetros  $\omega_n$  y  $\zeta$  y calcular los parámetros  $\zeta$ ,  $\omega_d$ ,  $M_p$ ,  $t_d$ ,  $t_r$ ,  $t_p$  y  $t_s$ .
- 3) Realice la simulación del circuito de la práctica siguiendo el procedimiento experimental solo para los valores iniciales de los tres potenciómetros. Guarde la simulación y entregue una copia impresa o en formato electrónico de los resultados de acuerdo con lo indicado por el profesor.



**Figura 5.3.** Sistema de segundo orden masa-resorte-amortiguador.

## Equipo

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

## Material

- 3 Amplificadores operacionales LM741
  - 6 Resistencias de  $10 \text{ k}\Omega$ ,  $\frac{1}{2}$  watt
  - 2 Capacitores de  $1 \text{ nF}$
  - 3 Potenciómetros de  $50 \text{ k}\Omega$
  - Tableta de conexiones (protoboard)
  - Alambres para conexiones calibre 20 0 22
  - Cables banana-caimán y caimán-caimán
- NOTA:** Está prohibido el uso de jumpers para las conexiones del circuito.

## Procedimiento experimental

1. Arme el circuito mostrado en la figura 5.4 polarizando el circuito con  $\pm 10V_{CD}$  en las terminales  $V+$  y  $V-$ .
2. Calibrar los tres potenciómetros (1/M, K/M, D/M) al valor indicado por los coeficientes de la ecuación escalada en amplitud, donde el valor en  $k\Omega$  del potenciómetro será el producto del coeficiente de la ecuación por el valor del potenciómetro que es de  $50 k\Omega$ , por ejemplo:

$$\frac{1}{M} = 0.2 \rightarrow 0.2 * 50k\Omega = 10k\Omega$$

3. La calibración debe efectuarse con el potenciómetro desconectado y midiendo la resistencia entre el cursor (terminal central) y la terminal que va a tierra.

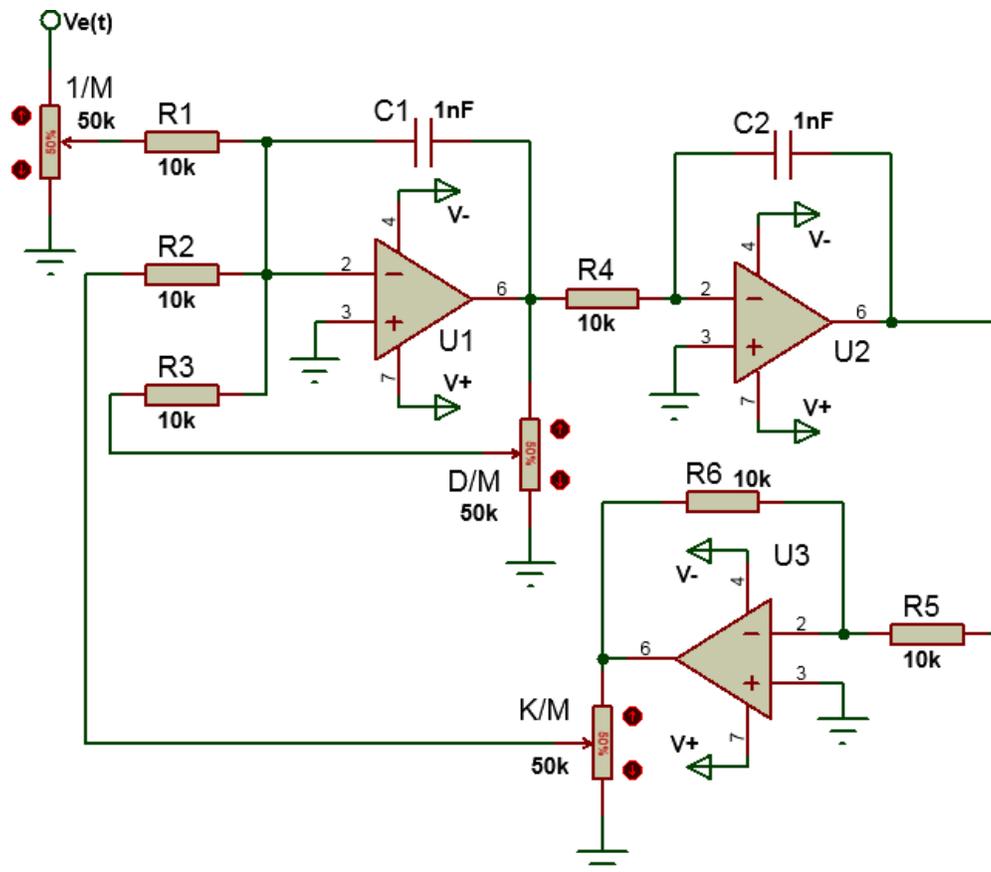


Figura 5.4. Circuito que representa un sistema de segundo orden.

4. Empleando la señal de entrada escalón  $V_e$  de  $5V_{pp}$  con offset de  $2.5V_{CD}$  y una frecuencia de  $100Hz$ , observar el voltaje de salida del segundo integrado  $x(t)$  y medir y anotar los parámetros  $M_p$ ,  $t_r$ ,  $t_p$  y  $t_s$ .
5. Variar los potenciómetros, uno a la vez y dar una explicación de los efectos observados sobre la respuesta, regresar el potenciómetro empleado a su posición original y repetir el mismo proceso para los potenciómetros restantes.

6. Obtener las gráficas de  $x(t)$  manteniendo los parámetros  $1/M$ ,  $K/M$  en su posición y variando el parámetro  $D/M$  para tres diferentes valores.
7. Repetir la operación del punto anterior y graficar  $x(t)$  manteniendo  $K/M$  y  $D/M$  en sus valores originales y variando el parámetro  $1/M$  para tres diferentes valores.

## Cuestionario.

- 1) Comparar los parámetros teóricos ( $M_p$ ,  $t_r$ ,  $t_p$  y  $t_s$ ) de la actividad previa con los valores del inciso 4 e indicar si existen diferencias. Para hacer la comparación se deben multiplicar los valores  $t_r$ ,  $t_p$  y  $t_s$  prácticos por un factor igual a 25,330 que es la ganancia total aproximada de los tres amplificadores operacionales a una frecuencia de 100Hz.
- 2) Indicar porque causas varía la forma de la respuesta  $x(t)$  al variar los parámetros  $D/M$ ,  $1/M$  y  $K/M$  en el punto 7.

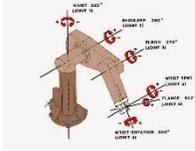
## Conclusiones

Elabore un resumen que muestre las conclusiones a las que haya llegado después de realizar todas las actividades de esta práctica.

## Bibliografía

Elabore una lista de las referencias bibliográficas consultadas.

## Laboratorio de Teoría de Control y Robótica

Práctica 6  
Controlador P (Proporcional)

## Tema

1.5. Controladores proporcionales.

## Objetivos

Al término de esta práctica el alumno podrá:

- El alumno conocerá y comprenderá el funcionamiento del control proporcional en un sistema.
- Aprenderá la forma en la que el control proporcional puede ser aplicado en un sistema.

## Introducción

En este tipo de control la salida depende directamente del error. Se define como error a la diferencia entre el valor real o Medido y el valor deseado correspondientes a la variable del proceso que se desea controlar.

$$e = m - Sp$$

Donde:

$e$  es el error obtenido

$m$  es el valor medido

$Sp$  es el valor deseado

La principal característica del control proporcional es que la relación entre la salida del controlador es proporcional a la magnitud del error, es decir, puede expresarse mediante una ecuación lineal.

$$S = Kp \times e + So$$

Donde:

$S$  es la salida del sistema

$Kp$  es la ganancia proporcional

$e$  es el error obtenido

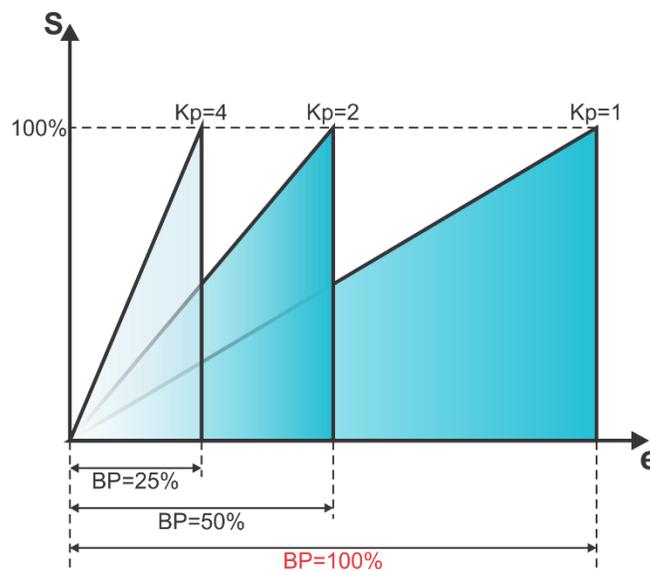
$So$  condiciones iniciales, también llamadas bias. El bias del controlador es el valor de la acción de control cuando el error es nulo.

La ganancia ( $K_p$ ) de un controlador es algo que podemos ajustar, en controladores analógicos tomara la forma de un potenciómetro, en sistemas de control digitales puede tomar la forma de un parámetro programable.

Usualmente se emplea en lugar de la ganancia proporcional  $K_p$  otro parámetro llamado Banda proporcional (BP). La BP es la modificación expresada en porcentaje de la variación de entrada al controlador  $e$ , requerida para producir un cambio del 100% en la salida  $S$ , este concepto está determinado por la expresión:

$$BP = 100 \div K_p$$

La figura 6.1 muestra la relación existente entre el error y la salida, se muestra la BP necesaria en cada caso para obtener una salida del 100%.



**Figura 6.1.** Relación existente entre el error y la salida.

Algunas de las desventajas del control P es que no elimina el error, solo lo reduce y no tiene inmunidad al ruido.

## Actividades previas a la práctica

- 1) El alumno realizará la lectura de la práctica.
- 2) Realice la simulación de circuito de la figura 6.2 siguiendo el procedimiento experimental. Guarde la simulación y entregue una copia impresa o en formato electrónico de los resultados de acuerdo con lo indicado por el profesor.
- 3) El alumno deberá traer el circuito de la figura 6.2 previamente armado.

## Equipo

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

## Material

- 2 Amplificadores operacionales LM741
- 1 Transistor TIP41
- 1 Transistor TIP42
- 2 Potenciómetros de 10kΩ
- 6 Resistencias 10kΩ
- 2 Resistencias 680 Ω
- 1 Motor 9V o de 12V
- Tableta de conexiones (protoboard)
- Alambres para conexiones calibre 20 0 22
- Cables banana-caimán y caimán- caimán
- NOTA:** Está prohibido el uso de jumpers para las conexiones del circuito.

## Procedimiento experimental

1. Arme el circuito mostrado en la figura 6.2.
2. Coloque ambos potenciómetros aproximadamente en la posición media del giro total.

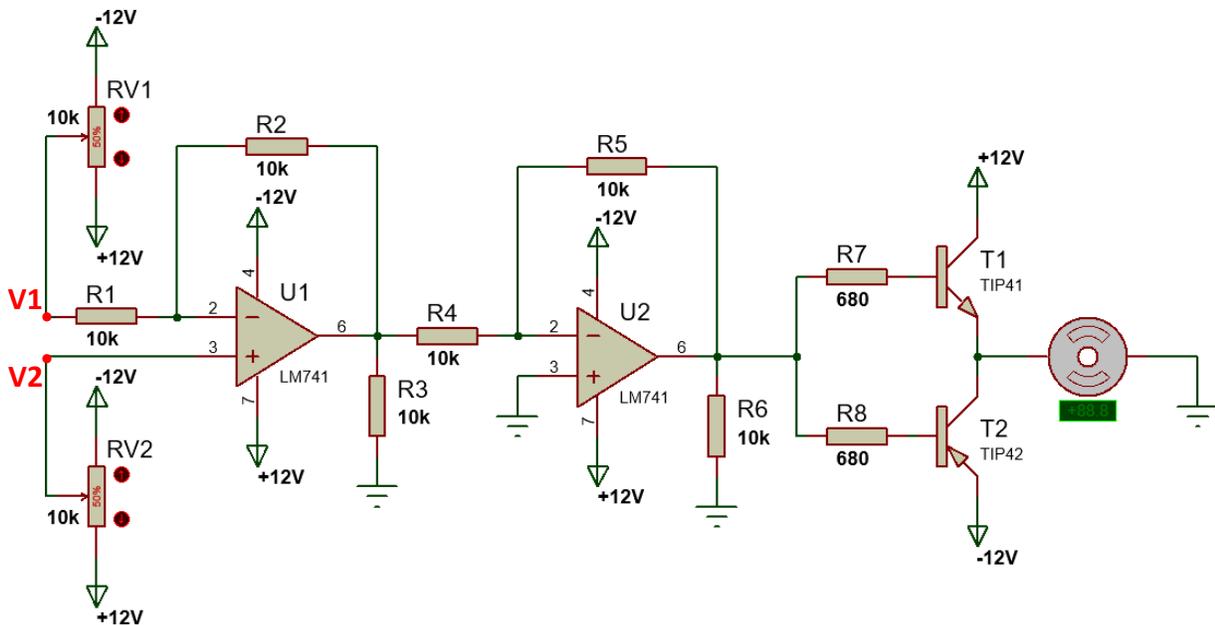


Figura 6.2. Circuito del controlador proporcional.

3. Gire lentamente el potenciómetro RV2 hacia la izquierda y observe el comportamiento del motor. En este punto se hace notar que el alumno es parte del sistema de control, al actuar como controlador y determinar la posición del potenciómetro.
4. Mida los voltajes en los puntos V1 y V2, así como la corriente a través de las resistencias R7 y R8.
5. Gire lentamente el potenciómetro RV2 hacia la derecha y observe el comportamiento del motor.
6. Mida los voltajes en los puntos V1 y V2, así como la corriente a través de las resistencias R7 y R8.
7. Gire cuidadosamente el potenciómetro RV2 hasta el punto en donde el motor deja de girar, repita el paso 6.
8. Gire el potenciómetro RV1 ligeramente en cualquier dirección, observe que sucede con el motor.
9. Repita los pasos de 3 a 8.

## Cuestionario.

- 1) Explique cómo funciona el control proporcional en el circuito.
- 2) Explique con sus propias palabras ¿cómo forma parte el alumno dentro del sistema de control?
- 3) ¿En qué momento se detenía el motor y porque pasaba esto?
- 4) ¿Cuál es el motivo por el que cambia de dirección el motor?
- 5) Cuando modificas la posición del potenciómetro RV1, ¿Qué sucede con el circuito?

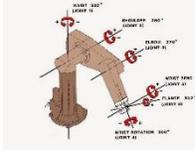
## Conclusiones

Elabore un resumen que muestre las conclusiones a las que haya llegado después de realizar todas las actividades de esta práctica.

## Bibliografía

Elabore una lista de las referencias bibliográficas consultadas.

## Laboratorio de Teoría de Control y Robótica

Práctica 7  
Controlador PI

## Tema

## 1.6. Controladores proporcionales – integrales.

## Objetivos

Al término de esta práctica el alumno podrá realizar:

- Analizar los efectos de un controlador integral dentro de un sistema de segundo orden.
- Interpretar las características que afectan el comportamiento de un controlador.

## Introducción

Muchos sistemas realimentados que no tienen un controlador, como el mostrado en la figura 7.1, usualmente tienen una variación con respecto al eje de referencia la cual es llamada *error en estado estable* ( $e_{ee}$ ), éste 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.

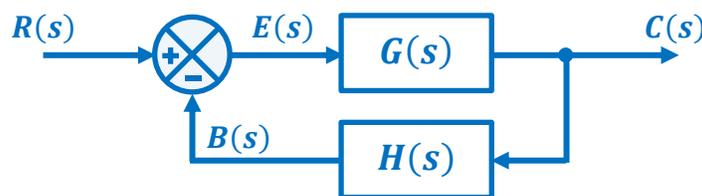


Figura 7.1. Sistema de lazo cerrado.

Mediante la aplicación de un controlador en la señal de error  $E(s)$  es posible eliminar este tipo de error y mejorar también algunos de los parámetros propios de la función. Al agregar un controlador del tipo proporcional se puede lograr un tiempo de respuesta más rápido, aunque se podría generar una mayor oscilación, la cual no es conveniente que sobrepase el 30%.

Si se aplica un controlador de tipo integral éste producirá que la señal de error tienda a cero por lo que en cierto momento la señal llegará al eje de referencia, y en caso de que existan cambios muy bruscos en la señal de error, el controlador no le permitirá afectar tanto a la señal pues actúa como un filtro pasa bajas.

Para obtener mejores resultados en nuestro controlador y que este pueda tener la mejor calidad posible, se pueden combinar los efectos de un controlador proporcional y los de un integrador lo que nos daría como resultado un controlador PI.

## Actividades previas a la práctica

- 1) El alumno realizará la lectura de la práctica.
- 2) Realice la simulación de los circuitos de la práctica siguiendo el procedimiento experimental. Guarde la simulación y entregue una copia impresa o en formato electrónico de los resultados de acuerdo con lo indicado por el profesor.
- 3) El alumno deberá traer el circuito de la práctica previamente armado.

## Equipo

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

## Material

- 6 Amplificadores operacionales LM741
- 8 Resistencias  $10\text{k}\Omega$ ,  $\frac{1}{2}\text{ W}$
- 2 Resistencias  $47\text{k}\Omega$ ,  $\frac{1}{2}\text{ W}$
- 2 Resistencias  $33\text{k}\Omega$ ,  $\frac{1}{2}\text{ W}$
- 2 Resistencia  $5.6\text{k}\Omega$ ,  $\frac{1}{2}\text{ W}$
- 1 Resistencia  $150\text{k}\Omega$ ,  $\frac{1}{2}\text{ W}$
- 2 Capacitores  $10\text{nF}$
- 1 Capacitor  $150\text{nF}$
- 1 Potenciómetro  $50\text{k}\Omega$
- Tableta de conexiones (protoboard)
- Alambres para conexiones calibre 20 0 22
- Cables banana-caimán y caimán- caimán

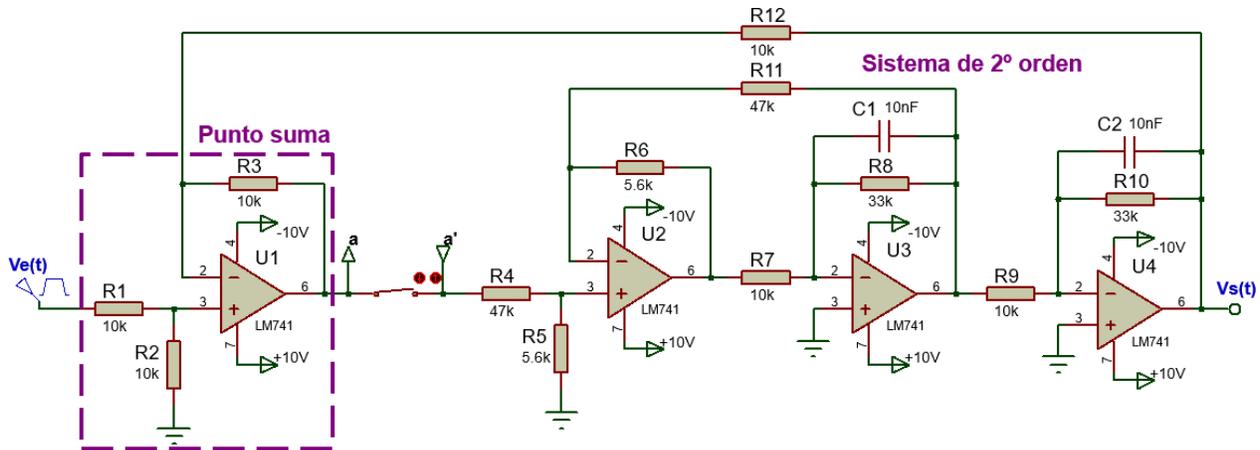
**NOTA:** Está prohibido el uso de jumpers para las conexiones del circuito.

## Procedimiento experimental

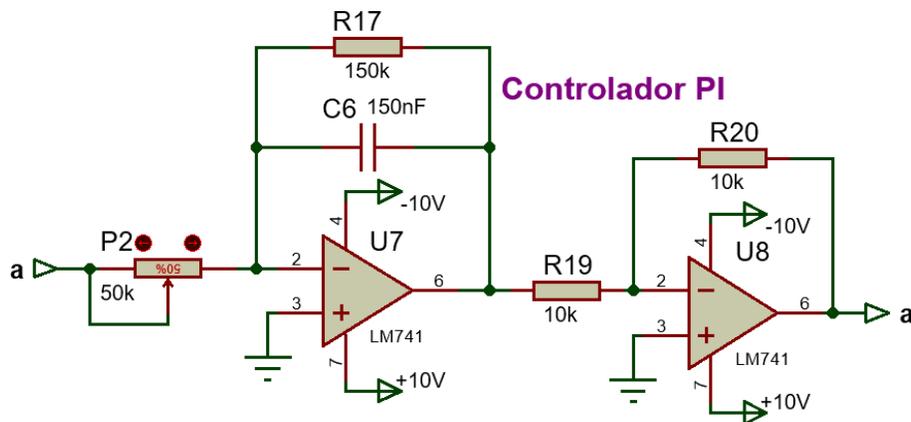
1. Para el circuito mostrado en la figura 7.2 polarice los amplificadores con  $\pm 10\text{V}_{\text{CD}}$  en las terminales correspondientes. Este circuito representa un sistema de segundo orden en lazo cerrado similar al de la figura 7.1.

**NOTA:** Este mismo circuito será empleado en la práctica 8 por lo que si es posible no lo desarme.

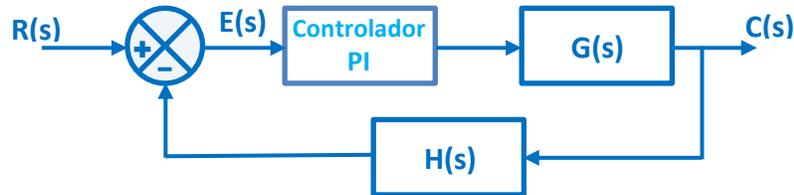
2. Calibre el generador de funciones para obtener a su salida una señal cuadrada con una amplitud de 1V, sin parte negativa y una frecuencia de 100Hz.
3. Conecte el generador de funciones en el punto  $V_e$ , como se indica en la figura 7.2.



4. Con ayuda del osciloscopio en acoplo de CD, y con el interruptor entre los puntos  $a$ - $a'$  cerrado, observe y grafique las señales de entrada  $V_e$  y de salida  $V_s$  acotándolas correctamente. Esto representa una entrada escalón y la respuesta del sistema de segundo orden en lazo cerrado.
5. Abra el interruptor del circuito entre los puntos  $a$ - $a'$ , que representa el punto donde se encuentra la señal de error  $E(t)$ , conecte el punto  $a$  con la entrada circuito controlador PI de la figura 7.3 y el punto  $a'$  con la salida del circuito controlador PI. El circuito resultante representa al sistema de lazo cerrado con controlador PI de la figura 7.4.



6. Utilizando el generador de funciones, inserte la misma señal  $V_e$  que se ha venido empleando a lo largo de la práctica.



**Figura 7.4.** Sistema de lazo cerrado con controlador PI.

7. Retire el potenciómetro del circuito y con ayuda del multímetro calíbrelo hasta obtener  $25k\Omega$ .
8. Con ayuda del osciloscopio, nuevamente observe y grafique las señales de entrada  $V_e$  y de salida  $V_s$  acotándolas correctamente.
9. Gire el potenciómetro hasta obtener una señal sin oscilaciones y grafique las señales de entrada  $V_e$  y de salida  $V_s$ .
10. Gire el potenciómetro hasta obtener una señal con el mayor número de oscilaciones posibles sin que se vuelva inestable.
11. Una vez más grafique las señales de entrada  $V_e$  y de salida  $V_s$ .

## Cuestionario

- 1) Compare las señales obtenidas en los puntos 4 y 8 del procedimiento y comente sus observaciones sobre los efectos del controlador PI.
- 2) ¿Qué efectos produce el variar la resistencia del controlador?
- 3) Determine la función de transferencia del controlador PI representado por el circuito de la figura 7.3.

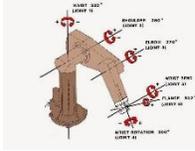
## Conclusiones

Elabore un resumen que muestre las conclusiones a las que haya llegado después de realizar todas las actividades de esta práctica.

## Bibliografía

Elabore una lista de las referencias bibliográficas consultadas.

## Laboratorio de Teoría de Control y Robótica

Práctica 8  
Controlador PID

## Tema

1.8. Controlador proporcional – integral – derivativo.

## Objetivos

Al término de esta práctica el alumno podrá realizar:

- Obtener la respuesta de un sistema con controlador PID
- Encontrar los puntos óptimos de trabajo de un controlador PID para señales de salida con tiempo de subida cortos
- Deducir los puntos óptimos de trabajo de un controlador PID para señales sin oscilaciones

## Introducción

Los controladores PID, también conocidos como de atraso-adelanto, son los más usados en la industria del control por las características que ofrecen los tres tipos de controladores acoplados para un mejor desempeño. Un controlador proporcional brinda la posibilidad de variar la ganancia. El controlado integral, también llamada compensación en retraso, aumenta la ganancia de las bajas frecuencias, lo que mejora la exactitud de la respuesta, corrigiendo así el error en estado estable. El controlador derivativo, también llamado en adelanto, incrementa el ancho de banda y acelera la respuesta, decrementando el máximo sobre impulso de la respuesta escalón.

La ecuación característica de un controlador PID es:

$$G_C(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

Donde:  $K_p$  =ganancia proporcional  
 $T_i$  =constante de tiempo de integración  
 $T_d$  =constante de tiempo de derivación

El esquema de un controlador PID implementado con amplificadores operacionales se puede apreciar en la figura 8.1.

En esta práctica se aprovechará el circuito equivalente de un sistema de segundo orden de la práctica 7 pues es un sistema conocido, para observar de forma clara el cambio producido al aplicar el controlador PID, con lo que los parámetros de respuesta del sistema se verán corregidos y mejorados, según sea el caso, por ejemplo se eliminara el error en estado estable, se mejorara la velocidad de respuesta y se disminuirán las oscilaciones del estado transitorio, esto dependerá de las ganancias dadas a cada parte del controlador.

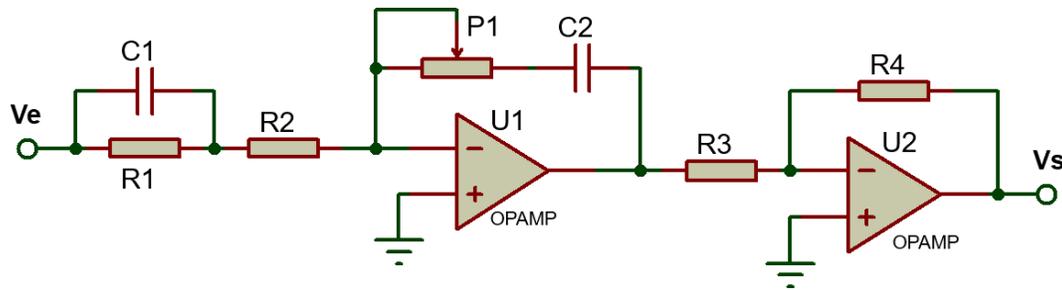


Figura 8.1. Esquema de un controlador PID (atraso-adelanto)

## Actividades previas a la práctica

- 1) El alumno realizará la lectura de la práctica.
- 2) Realice la simulación de los circuitos de la práctica siguiendo el procedimiento experimental. Guarde la simulación y entregue una copia impresa o en formato electrónico de los resultados de acuerdo con lo indicado por el profesor.
- 3) El alumno deberá traer el circuito de la práctica previamente armado.

## Equipo

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

## Material

- 6 Amplificadores operacionales LM741
- 8 Resistencias  $10\text{k}\Omega$ ,  $\frac{1}{2}\text{ W}$
- 2 Resistencias  $47\text{k}\Omega$ ,  $\frac{1}{2}\text{ W}$
- 4 Resistencias  $33\text{k}\Omega$ ,  $\frac{1}{2}\text{ W}$
- 2 Resistencias  $5.6\text{k}\Omega$ ,  $\frac{1}{2}\text{ W}$
- 2 Capacitores  $10\text{nF}$
- 2 Capacitores  $22\text{nF}$
- 1 Potenciómetro  $50\text{k}\Omega$
- Tableta de conexiones (protoboard)
- Alambres para conexiones calibre 20 0 22
- Cables banana-caimán y caimán-caimán

**NOTA:** Está prohibido el uso de jumpers para las conexiones del circuito.

## Procedimiento experimental

1. Pare el circuito mostrado en la figura 8.2 polarice los amplificadores con  $\pm 10V_{CD}$  en las terminales correspondientes. Este es el mismo circuito del sistema de segundo orden que se utilizó en la práctica 7.
2. Calibre el generador de funciones para obtener a su salida una señal cuadrada de  $1V_p$  y una frecuencia de 100Hz.
3. Conecte el generador de funciones en el punto  $V_e$ , como se indica en la figura 8.2.

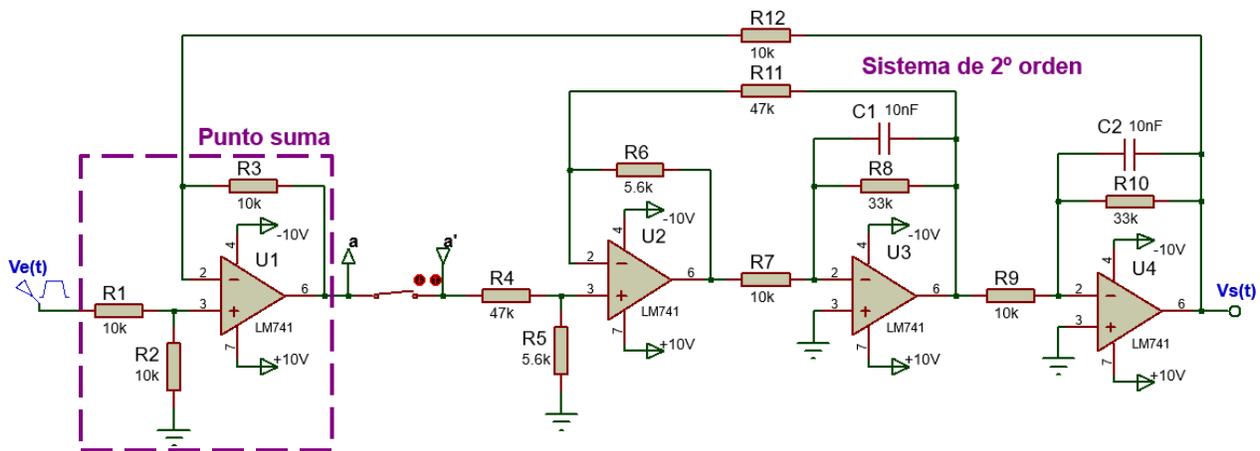


Figura 8.2. Circuito que representa un sistema de segundo orden.

4. Con ayuda del osciloscopio en acoplo de CD, y con el interruptor entre los puntos  $a$ - $a'$  cerrado, observe y grafique las señales de entrada  $V_e$  y de salida  $V_s$  acotándolas correctamente. Esto representa una entrada escalón y la respuesta del sistema de segundo orden en lazo cerrado.
5. Abra el interruptor del circuito entre los puntos  $a$ - $a'$ , que representa el punto donde se encuentra la señal de error  $E(t)$ , conecte el punto  $a$  con la entrada circuito controlador PID de la figura 8.3 y el punto  $a'$  con la salida del circuito controlador PID. El circuito resultante representa al sistema de lazo cerrado con controlador PID de la figura 8.4.

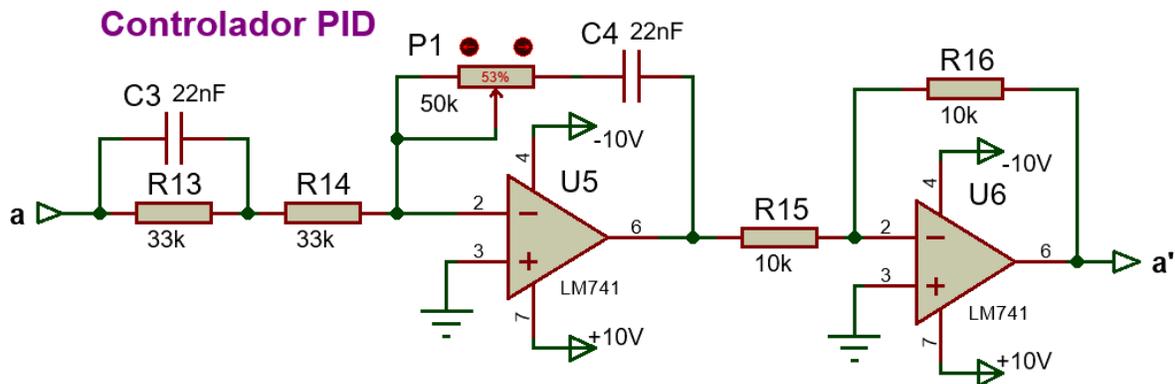
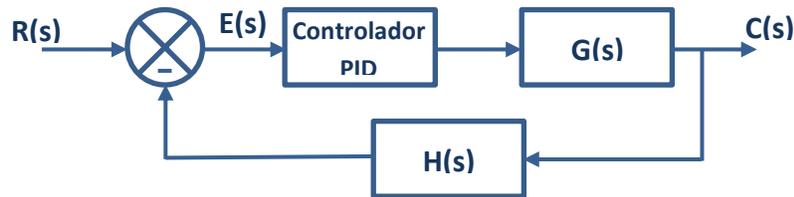


Figura 8.3. Circuito controlador proporcional integral derivativo (PID).

- Utilizando el generador de funciones, inserte la misma señal  $V_e$  que se ha venido empleando a lo largo de la práctica.



**Figura 8.4.** Sistema de lazo cerrado con controlador PI.

- Gire el potenciómetro hasta obtener  $50k\Omega$  entre las terminales que están unidas y la terminal del extremo contrario y compruebe con ayuda del multímetro dicho valor.
- Haciendo uso del osciloscopio, nuevamente observe y grafique las señales de entrada  $V_e$  y de salida  $V_s$  acotándolas correctamente.
- Gire el potenciómetro hasta obtener la señal de repuesta con el menor tiempo de subida y la menor cantidad de oscilaciones posible y grafique las señales de entrada  $V_e$  y de salida  $V_s$ .
- Anote sus observaciones de los efectos producidos por el controlador PID.
- Desconecte el potenciómetro teniendo cuidado de identificar la forma en que se encuentran conectadas sus terminales, mida su resistencia y anótela. Recuerde que es importante retirar el potenciómetro del circuito para realizar la medición ya que de lo contrario se producirían errores en la medición debido a otras impedancias dentro del circuito.

## Cuestionario

- Describa el funcionamiento de un controlador PID en base a lo ocurrido en la práctica.
- Compare la respuesta obtenida usando el controlador PID respecto de lo observado en la práctica anterior empleando el controlador PI. Anote sus comentarios.
- Determine la función de transferencia del controlador PID representado por el circuito de la figura 8.3.

## Conclusiones

Elabore un resumen que muestre las conclusiones a las que haya llegado después de realizar todas las actividades de esta práctica.

## Bibliografía

Elabore una lista de las referencias bibliográficas consultadas.