

Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán

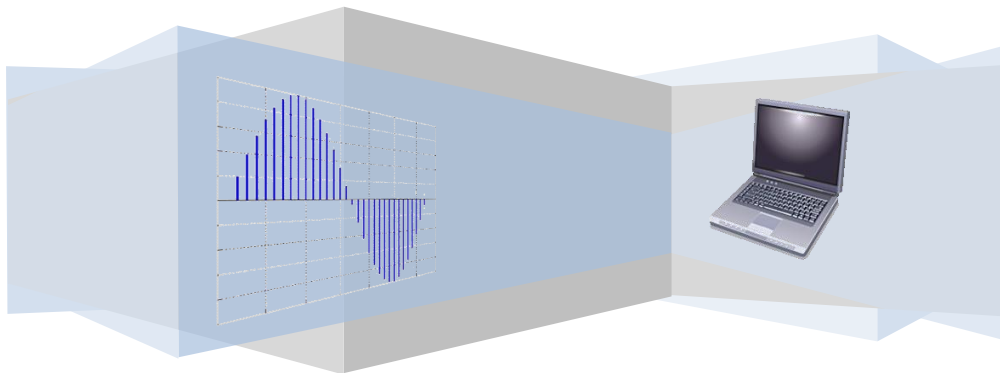


Departamento: Ingeniería
Sección: Electrónica

Laboratorio de Control Digital

Asignatura: Control Digital
Carrera: 116

Clave Asignatura: 1820 Clave



Autores:

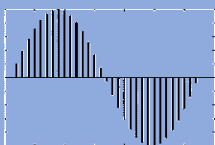
M. en TI. Jorge Buendía Gómez

M. en C. Leopoldo Martín del Campo R.

Fecha de Elaboración: 2000

Fecha de Revisión: Julio 2024

Semestre 2025-1

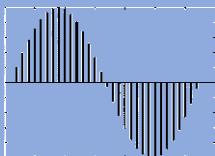


Laboratorio de Control Digital

Índice



Índice		1
Prólogo		2
Reglamento		5
Práctica 1	Muestreadores y Retenedores	7
	1.6. Efectos de cuantización y muestreo	
Práctica 2	Convertidor Analógico Digital Discreto	12
	1.6. Efectos de cuantización y muestreo	
	2.1. Discretización de sistemas continuos	
Práctica 3	Convertidor Digital Analógico Integrado	16
	4. Diseño de sistemas de control digital a partir de funciones de transferencias discretas	
Práctica 4	Convertidor Analógico Digital con Realimentación	20
	5.3. Realimentación de la salida	
Práctica 5	Control de Velocidad de Motor de CD por Modulación PWM	23
	6.3. Sensores, actuadores y dispositivos auxiliares.	
Práctica 6	Motores de Pasos	27
	6.4. Ejemplos de aplicación	
Práctica 7	Análisis y Simulación de Sistema Digital con Matlab	31
	6.4. Ejemplos de aplicación	
Práctica 8	Filtros Digitales	38
	6.4. Ejemplos de aplicación	



Laboratorio de Control Digital

Prólogo



Objetivo del curso

- Familiarizar al alumno con los principales métodos de análisis y diseño de los sistemas de control digital, así como con la realización práctica de los algoritmos de control que con mayor frecuencia se emplean.

Objetivos del Laboratorio

- Analizar y comprobar los tres procesos empleados en la digitalización de las señales analógicas: muestreo, retención y cuantización.
- Comprobar las diferentes formas de conversión analógica digital (CAD) y la conversión digital analógica (CDA) así como emplear sensores de señales físicas a través de transductores e implementarlos en un sistema de control digital.
- Implementar el control de motores para la construcción de máquinas herramientas y robots.

Introducción

En el laboratorio de Control Digital los alumnos deberán realizar la comprobación de los conceptos teóricos más relevantes utilizados para la digitalización de señales analógicas. Este proceso de digitalización es muy importante ya que la mayoría del procesamiento actual se realiza a través de sistemas digitales o de computadoras debido a la flexibilidad y capacidad de manipulación de la información de los sistemas de cómputo.

En la actualidad el procesamiento de señales se realiza de forma digital, debido a la fuerte presencia de los sistemas digitales en la vida diaria. Sin embargo, la generación de señales del mundo real sigue siendo analógica, señales como la voz, el audio, el video, la temperatura, la presión, la posición de un motor, etc., son indiscutiblemente señales analógicas y es por ello por lo que siempre estarán presentes los circuitos electrónicos de conversión analógica digital y de conversión digital analógica.

Para llevar a cabo esta transformación de señal analógica a señal digital (discretización), se requieren 3 procesos independientes que son:

- Muestreo
- Retención
- Cuantización

Estos 3 procesos se pueden implementar de forma práctica a través de circuitos electrónicos, que permiten analizar los parámetros de funcionamiento más representativos de la discretización de señales.

Otro de los elementos importantes en el proceso de control es la adquisición de datos a través de convertidores analógico digital (CAD) y convertidores digitales analógicos (CDA), tanto discretos como integrados ya que son la interfaz directa entre el mundo real, básicamente analógico, y el sistema de control, básicamente digital.

Dentro de las prácticas se visualiza y comprueba el funcionamiento de algunos convertidores básicos, necesarios para comprender la influencia de estos circuitos dentro de los sistemas de adquisición de datos comerciales (DAQ) y su aplicación en la captura de señales procedentes de sensores.

En estas prácticas se incluye el control de motores de corriente directa y de motores de pasos necesarios para la implementación de sistemas mecánicos industriales o de robots. El control se realiza utilizando sistemas digitales integrados tales como los microcontroladores y sistemas digitales discretos diseñados específicamente para la aplicación planteada.

Finalmente, el alumno deberá comprender la necesidad de interacción entre las diferentes áreas de la Ingeniería para llevar a la práctica un sistema de control digital real.

Entre estas áreas se distinguen:

- Electrónica
- Control Analógico
- Control Digital
- Diseño Lógico
- Computación
- Diseño de Software
- Electrónica de Potencia
- Mecánica
- Motores
- y algunas áreas adicionales.

Instrucciones para la elaboración del reporte

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

	U.N.A.M. F.E.S.Cuautitlán
Laboratorio de:	_____
Grupo:	_____
Profesor:	_____
Alumno:	_____
Nombre de la 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:

- Actividades previas
- Introducción

- Procedimiento experimental
- Circuito armado
- Tablas de datos
- Mediciones
- Gráficas
- Comentarios
- Observaciones
- Esquemas
- Diagramas
- Cuestionario
- Conclusiones

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

Los criterios de evaluación para el laboratorio son los siguientes:

N°	Criterio de evaluación	Porcentaje
C1	Actividades Previas	30 %
C2	Habilidad en el armado y funcionalidad de los sistemas	20 %
C3	Habilidad para el manejo del equipo e interpretación correcta de las lecturas	20 %
C4	Reporte entregado con todos los puntos indicados	30 %

Bibliografía

1. Franklin G., F. Powel J. (1975), *Digital Control of Dynamic Sysytems*, Addison- Wesley Publishing Company.
2. Smith C. L. (1972), *Digital Computer Process Control*, Intex Educational Publishers.
3. Cadzow J., Martens H. (1970), *Discrete Time and Computer Control*, Systems Prentice Hall Inc.
4. Kuo, Benjamin C. (2003), *Sistemas de Control Digital*, México, CECSA, 5ª Edición.
5. Ogata, Katsuhiko (1996), *Sistemas de Control en Tiempo Discreto*, México, Prentice Hall, Hispanoamericana, 2ª Edición.
6. Dorf, Richard C, Bishop, Robert H. (2005), *Sistemas de Control Moderno*, España, PEARSON Prentice Hall, 10ª Edición.
7. Houpis, Constantine H., Lamont Gary B. (1985), *Digital Control Systems, USA*, Mc Graw Hill.
8. Gómez Campomanes José (2007), *Problemas resueltos de Control Digital*, México, Thomson Paraninfo S.A.
9. Basañez Villaluenga Luis (2002), *Control Digital: Problemas*, España, Universidad Politécnica de Cataluña.
10. Bolzern Paolo. (2009), *Fundamentos de Control Automático*, España, Mc Graw Hill Interamericana.
11. Barambones Oscar (2004), *Sistemas Digitales de Control*, España, Universidad del país Vasco.

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

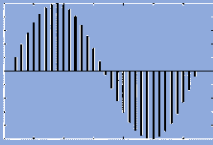
El presente reglamento de la sección electrónica tiene por objetivo establecer los lineamientos para el uso y seguridad de laboratorios, condiciones de operación y evaluación, que deberán de conocer y aplicar, estudiantes y profesores en sus cuatro áreas: comunicaciones, control, sistemas analógicos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

Práctica 1

Muestreadores y Retenedores



Tema:

1.6. Efectos de cuantización y muestreo

Objetivos

- El alumno implementará un dispositivo de muestreo y un dispositivo de retención para comprobar dos de los procesos empleados en la discretización de señales analógicas.
- El alumno analizará las variaciones que se producen en ambos procesos al cambiar los parámetros del sistema para diferentes señales de entrada.

Introducción

En los sistemas discretos, en los sistemas de datos muestreados y en los sistemas de control digital, por lo general una o varias de las señales que intervienen en el proceso son señales analógicas que deben ser transformadas a señales discretas para poder ser empleadas de forma adecuada dentro de este tipo de sistemas. Para lograr la discretización de las señales, se debe aplicar primero el proceso de muestreo y obtener así una señal formada únicamente por las muestras discretas en tiempo de la señal analógica.

El proceso de muestreo puede representarse a través de un interruptor que se cierra cada $t = kT$ segundos durante un tiempo de muestreo (p), generándose una señal de muestreo como la mostrada en la figura 1.1.

- t = Instante de muestreo
- T = Periodo de muestreo
- p = Tiempo de muestreo
- $k = 0, 1, 2, 3, \dots n$

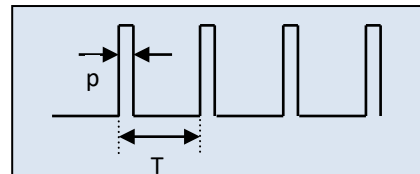


Figura 1.1

La ecuación $t = kT$ describe al muestreo periódico ya que las muestras están equiespaciadas, es decir las muestras son tomadas en instantes de tiempo que son múltiplos enteros del periodo de muestreo. También existen otros tipos de muestreo empleados para diferentes propósitos, los cuales se describen con ecuaciones similares a la mostrada anteriormente.

La entrada de este interruptor es una señal analógica y la salida es una señal muestreada como se puede observar en la figura 1.2.

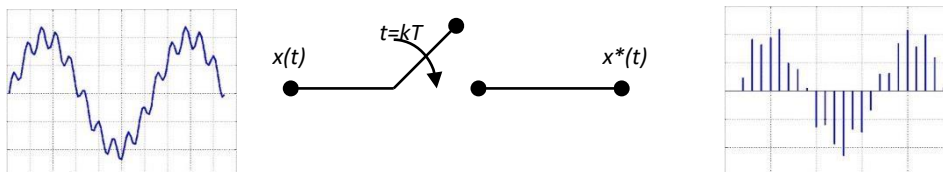


Figura 1.2 Muestreador

Otra forma de representar el proceso de muestreo es a través de un modulador en amplitud, que realiza la modulación de un tren de impulsos unitarios discretos generados en los instantes kT que se emplean como señal portadora y la señal analógica que se desea muestrear que se emplea como señal moduladora, obteniéndose como salida los pulsos discretos pero modulados en amplitud por la señal de entrada, a esta salida se le denomina la señal muestreada, tal y como se observa en la figura 1.3.

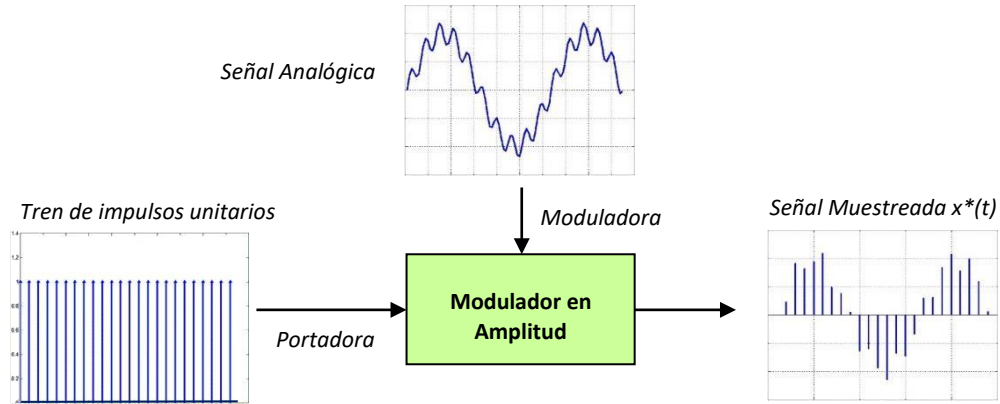


Figura 1.3

La operación que realiza el modulador puede representarse matemáticamente a través del producto del tren de impulsos unitarios y la señal analógica de entrada dando como resultado la siguiente expresión que define a la señal muestreada.

$$x^*(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \delta(t - kT) \cdot x(t)$$

Si a esta expresión se le aplica la transformada de Laplace y se toman las consideraciones necesarias, se obtiene la transformada Z de la función $x(t)$.

$$X(z) = \sum_{k=0}^{\infty} x(kT) \cdot z^{-k}$$

Otro dispositivo empleado en la digitalización de las señales analógicas para utilizarlas en los sistemas de datos muestreados es el retenedor.

El cual tiene la función de reconstruir la señal muestreada a partir de los valores de las muestras generadas por el muestreador, empleando para ello, polinomios de diferentes grados.

Entre los más empleados están los retenedores de orden cero y de primer orden.

Este proceso también se emplea para que los cuantizadores tengan en su entrada una señal constante que representa a la muestra actual y puedan tener el tiempo suficiente para realizar la conversión de código ya que la muestra original que se obtiene del muestreador tiene una duración muy corta.

En la figura 1.4 se presenta un retenedor de orden cero (Z_{0h}) y las formas de onda de su entrada y su salida.

En esta práctica se implementarán 2 circuitos que realizan las funciones de muestreo y retención respectivamente.

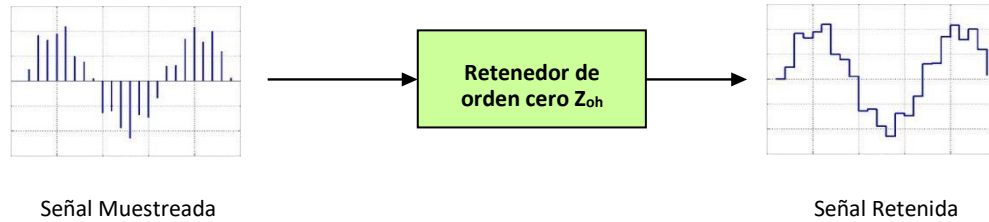


Figura 1.4

Estos circuitos se implementan a través de circuitos analógicos y amplificadores operacionales para poder visualizar las funciones que se realizan en estos 2 procesos, pero haciendo la anotación de que en los sistemas de control digital estas funciones se realizan a través de los convertidores analógico digitales que contienen de manera intrínseca a dichas funciones de muestreo y retención (S/H, Sample and Hold).

Actividades previas a la realización de la práctica

1. El alumno deberá realizar la lectura de la práctica.
2. El alumno investigará y explicará el concepto de teorema de muestreo de Nyquist.
3. El alumno investigará y explicará cuales retenedores se utilizan en los sistemas de conversión analógico digital.
4. Investigue el concepto de Aliasing y explique la relación que tienen con respecto al muestreo de señales analógicas.
5. Entregue a su profesor las actividades previas al inicio de la práctica.

Material

- 1 C.I. LM555
- 1 C.I. UA741
- 1 C.I. DG201 Switch Analógico CMOS SPST
- 2 Resistencias de $0.1\text{ k}\Omega$ a $\frac{1}{2}\text{ W}$.
- 1 Resistencia de $10\text{ k}\Omega$ a $\frac{1}{2}\text{ W}$.
- 1 Resistencia de $2.2\text{ k}\Omega$ a $\frac{1}{2}\text{ W}$.
- 1 Potenciómetro de $50\text{ k}\Omega$.
- 1 Capacitor de 1 nF .
- 1 Capacitor de 22 nF .
- 1 Capacitor de $0.1\text{ }\mu\text{F}$.
- 2 Capacitor de $100\text{ }\mu\text{F}$ electrolítico.

Este circuito integrado es de tecnología CMOS y deberá ser manejado con las precauciones necesarias para evitar que sufra daños.

Equipo

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

Procedimiento Experimental

1. Implemente el circuito de la figura 1.5, considere emplear el circuito DG417 en sustitución del circuito DG201 de la práctica, considerando que las terminales de ambos circuitos difieren en posición.

2. Este circuito realiza la operación de muestreo sobre la señal $V_e(t)$ y genera una señal muestreada $V_e^*(t)$, y consta de las siguientes partes:
 - Generador de pulsos de muestreo en configuración astable.
 - Interruptor analógico (interruptor bidireccional) controlado por pulsos.
3. Calibre el generador de funciones con una señal $V_e(t) = 2.5 \text{ Sen } 6283.18 t \text{ [V]}$.
4. Pruebe el sistema por partes, verificando el correcto funcionamiento de cada una de ellas.
 - Generador de pulsos de muestreo. (Terminal 3 del LM555)
 - Interruptor analógico (interruptor bidireccional) controlado por pulsos. (Terminal 3 del DG201)
5. Compruebe y analice el proceso de muestreo para las señales de entrada triangular y cuadrada además de la señal senoidal del punto anterior.
6. Mida los valores de periodo de muestreo (T) y el tiempo de muestreo (p) mínimo y máximo de la señal de salida del generador de pulsos variando el potenciómetro P1 a su valor mínimo y a su valor máximo.
7. Indique la frecuencia de muestreo mínima y máxima que se puede obtener con este circuito.
8. Empleando el teorema de Nyquist determine la frecuencia máxima de la señal de entrada $V_e(t)$ que puede ser muestreada con este sistema.

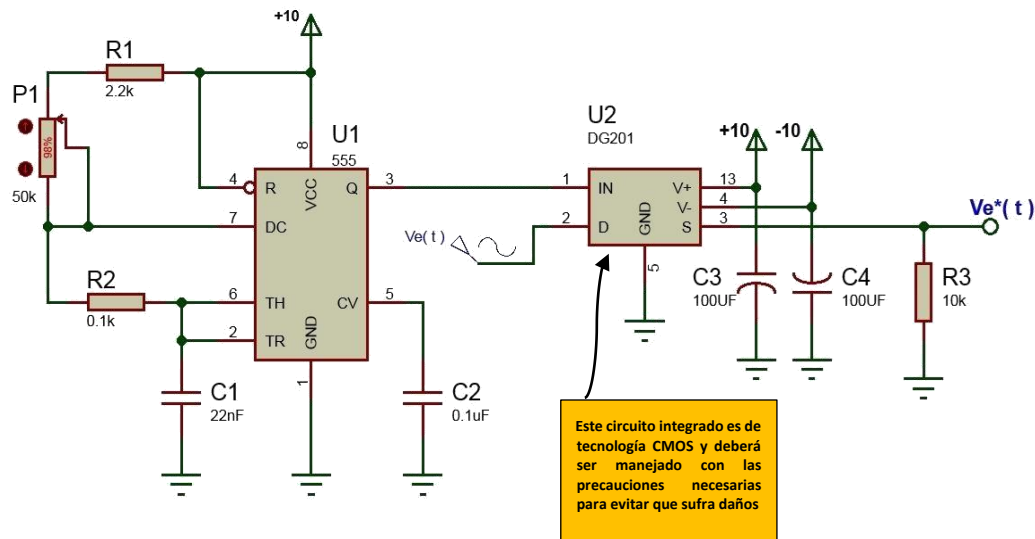


Figura 1.5

9. Varíe la frecuencia de la señal senoidal a un valor en el rango de 30KHz a 50KHz y observe el comportamiento simultáneo de las señales de entrada $V_e(t)$ y de salida $V_e^*(t)$, ajuste el valor de frecuencia para obtener un proceso de muestreo equivalente (Aliasing o Señal de salida que no es muestreada adecuadamente debido a que no se toman las muestras necesarias para representarla). Grafique las señales para cada punto y anote los rangos de funcionamiento de cada una de las etapas, es muy importante llegar a una conclusión práctica de porque con este tipo de circuito no se puede llegar a muestrear señales de cualquier frecuencia o amplitud.

Retire la resistencia R3 de 10 K Ω que está conectada a la terminal 3 del interruptor analógico, ya que afecta el comportamiento del circuito retenedor que se adicionará a la salida del muestreador y regrese la señal de entrada a su valor de amplitud y frecuencia original $V_e(t) = 2.5 \text{ Sen } 6283.18 t$.

10. Añada el circuito de la figura 1.6 a la salida del circuito de la figura 1.5, el cual realizará la función de retención y observe la señal de salida $V_s(t)$ del circuito 1.6 y como se relaciona con la entrada $V_e(t)$. Anote

los comentarios en cuanto a las formas obtenidas, así como las gráficas correspondientes, haciendo las pruebas también para señales de diferentes tipos y frecuencias (triangular y cuadrada).

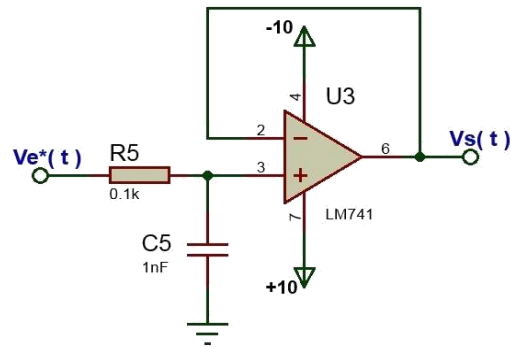


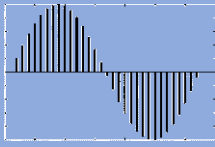
Figura 1.6

Cuestionario

1. Obtenga la función de transferencia en Laplace del retenedor empleado en la práctica (figura 1.6) indicando de que tipo es y explicando su funcionamiento.
2. Calcule el valor de la constante de tiempo del retenedor y el tiempo de carga del capacitor al 98% de su valor de carga final.
3. Verifique que se cumple la relación de tiempos siguiente, para el punto de máxima frecuencia de muestreo.

$$5\tau < p < T$$

4. Explique de manera gráfica lo que sucedería si la frecuencia de muestreo es elevada y la constante de tiempo RC del retenedor es mayor al periodo de muestreo T.
5. Describa los procesos de muestreo de orden múltiple, de ritmo múltiple y aleatorio.
6. Calcule los parámetros de tiempo del oscilador en modo astable implementado con el circuito LM555 de la figura 1.5 y compárelos con los obtenidos prácticamente. Para este paso refiérase a la hoja técnica del dispositivo LM555 donde se especifican las ecuaciones de funcionamiento.



Laboratorio de Control Digital

Práctica 2

Convertidor Analógico Digital Discreto



Tema

- 1.6. Efectos de cuantización y muestreo
- 2.1. Discretización de sistemas continuos

Objetivos

- El alumno construirá un convertidor analógico digital de aproximaciones sucesivas con elementos discretos.
- El alumno analizará las características de funcionamiento y verificará los cálculos teóricos con mediciones sobre el circuito.
- El alumno generará la curva de cuantización práctica.

Introducción

El primer proceso que se realiza dentro de un sistema de control digital es el proceso de muestreo, el cual nos permite obtener los valores discretos de la señal analógica de entrada en los diferentes instantes definidos por el periodo de muestreo, pero dichos valores son aún valores analógicos en amplitud aunque discretos en tiempo y no son directamente utilizables por una computadora digital, por lo tanto es necesario cuantizar dichos valores analógicos a través de convertidores analógico digitales que transforman el valor analógico de entrada a un código binario compatible con los sistemas digitales.

Un convertidor analógico digital (CAD) procesa un voltaje analógico de entrada y después de cierta cantidad de tiempo, denominado tiempo de conversión, produce un código digital de salida con un determinado número de bits como se muestra en la figura 2.1.

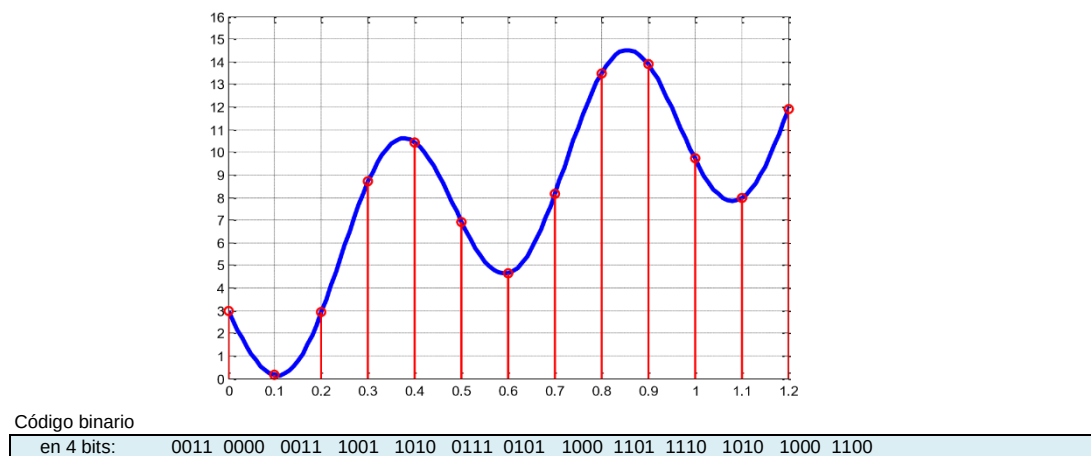


Figura 2.1

Este proceso está sujeto a errores debido al método de conversión, a los componentes empleados y a otras fuentes externas al proceso.

El proceso de conversión analógico digital generalmente es más complejo y tardado que el proceso de conversión digital analógico y para realizarlo se emplean varios métodos entre los que podemos nombrar: aproximaciones sucesivas, rampa digital, rampa analógica, de ráfaga y doble rampa como los más usuales.

El circuito implementado en la práctica realiza la conversión por el método de aproximaciones sucesivas en forma analógica, empleando para ello circuitos comparadores de voltaje, mallas de resistencias e inversores lógicos.

Material

- 1 C.I. LM339 Comparadores de voltaje
- 1 C.I. CD4069 (CMOS) Inversor Lógico
- 1 Transistor BC547
- 2 Resistencias de $39\text{ K}\Omega$ a $\frac{1}{2}\text{ W}$.
- 3 Resistencias de $22\text{ K}\Omega$ a $\frac{1}{2}\text{ W}$.
- 4 Resistencias de $10\text{ K}\Omega$ a $\frac{1}{2}\text{ W}$.
- 1 Resistencia de $5.6\text{ K}\Omega$ a $\frac{1}{2}\text{ W}$. 8 Resistencias de $1\text{ K}\Omega$ a $\frac{1}{2}\text{ W}$.
- 2 Potenciómetros de $50\text{ K}\Omega$
- 4 Leds

Equipo

- 1 Fuente de voltaje
- 1 Multímetro
- 1 Osciloscopio

Actividades previas a la realización de la práctica

1. El alumno deberá realizar la lectura de la práctica.
2. El alumno realizará el cálculo de los voltajes en cada una de las dos entradas de los cuatro comparadores del circuito de la figura 2.2 así como el código binario de salida para un voltaje de entrada de 3.3 V. Considere que el voltaje máximo de entrada es de 8 V.
3. Adjunte todos los cálculos realizados para el análisis y entréguelo a su profesor de laboratorio al inicio de la práctica.

Procedimiento Experimental

1. Implemente el circuito de la figura 2.2 alimentándolo con un voltaje **aproximado de $V_{CC} = 10\text{ V}$** . Dicho valor será modificado posteriormente a través del procedimiento del inciso 3.
2. Varíe el voltaje de entrada analógico $V_e(t)$, a través del potenciómetro P2, para que encienda alguno de los leds. Reajuste el nivel de la fuente de voltaje VCC hasta obtener 8V en la salida del inversor que tienen encendido el led.
3. El reajuste de la fuente de voltaje VCC es muy importante debido a que representa el valor de voltaje máximo de conversión y debido a ello, **este valor deberá mantenerse fijo durante el desarrollo de la práctica**, pues las mediciones y ajustes posteriores serían incorrectos si dicha fuente tuviera una variación.

4. Ajuste el voltaje de referencia **Vref** en el emisor del transistor BC547, a través del potenciómetro P1, hasta obtener 4 V, lo que representa la mitad del voltaje máximo de conversión.
5. Ajuste el potenciómetro P2 hasta obtener un voltaje de 3.3 V en la entrada $V_e(t)$ y compruebe que el código binario en las 4 salidas del circuito es (0110), también compruebe que los voltajes en las entradas positivas de los comparadores son 4 V, 6 V, 7 V y 6.5 V, respectivamente a partir del comparador U1A.
6. Anote las posibles variaciones de los niveles de voltaje, si las variaciones son grandes entonces existe un error en el armado del circuito.
7. Genere la curva de cuantización ($V_e(t)$ contra código binario) empleando 16 niveles, variando el potenciómetro P2 desde 0 V hasta 8 V, indicando en una tabla el nivel de voltaje analógico de entrada $V_e(t)$ y el correspondiente código binario proporcionado por el circuito.
8. Dibuje las gráficas de cuantización real, obtenida del circuito de prueba y la gráfica de cuantización ideal, en la misma gráfica y con el mismo sistema de coordenadas.
9. Compare ambas gráficas y comente acerca de los errores que presenta el circuito con respecto a linealidad, exactitud y errores en el proceso de conversión.

Cuestionario

1. Calcule el rango de cuantización (q) promedio del convertidor implementado.
2. Qué tiempo total requiere este sistema para realizar la conversión. Consultar manuales y anotar los tiempos de respuesta de cada uno de los circuitos que intervienen en el proceso, calculando posteriormente el tiempo total de conversión.
3. Qué tiempo requeriría un circuito similar al implementado si la conversión se realizara en 8 bits y compárelo con el tiempo de conversión de 2 convertidores analógico digitales comerciales de 8 bits. Anote sus comentarios con respecto a esta comparación, incluya la hoja de datos de los convertidores consultados señalando el parámetro de tiempo de conversión sobre la hoja.
4. Son iguales o diferentes los tiempos de conversión necesarios para convertir los voltajes de 2.8 V. y de 5.4 V. en el circuito de prueba de la práctica, justifique su respuesta.
5. Explique a través de una tabla de verdad la forma en que el método de aproximaciones sucesivas realiza la conversión a código binario empleando como voltaje de entrada $V_e = 6.3$ V.

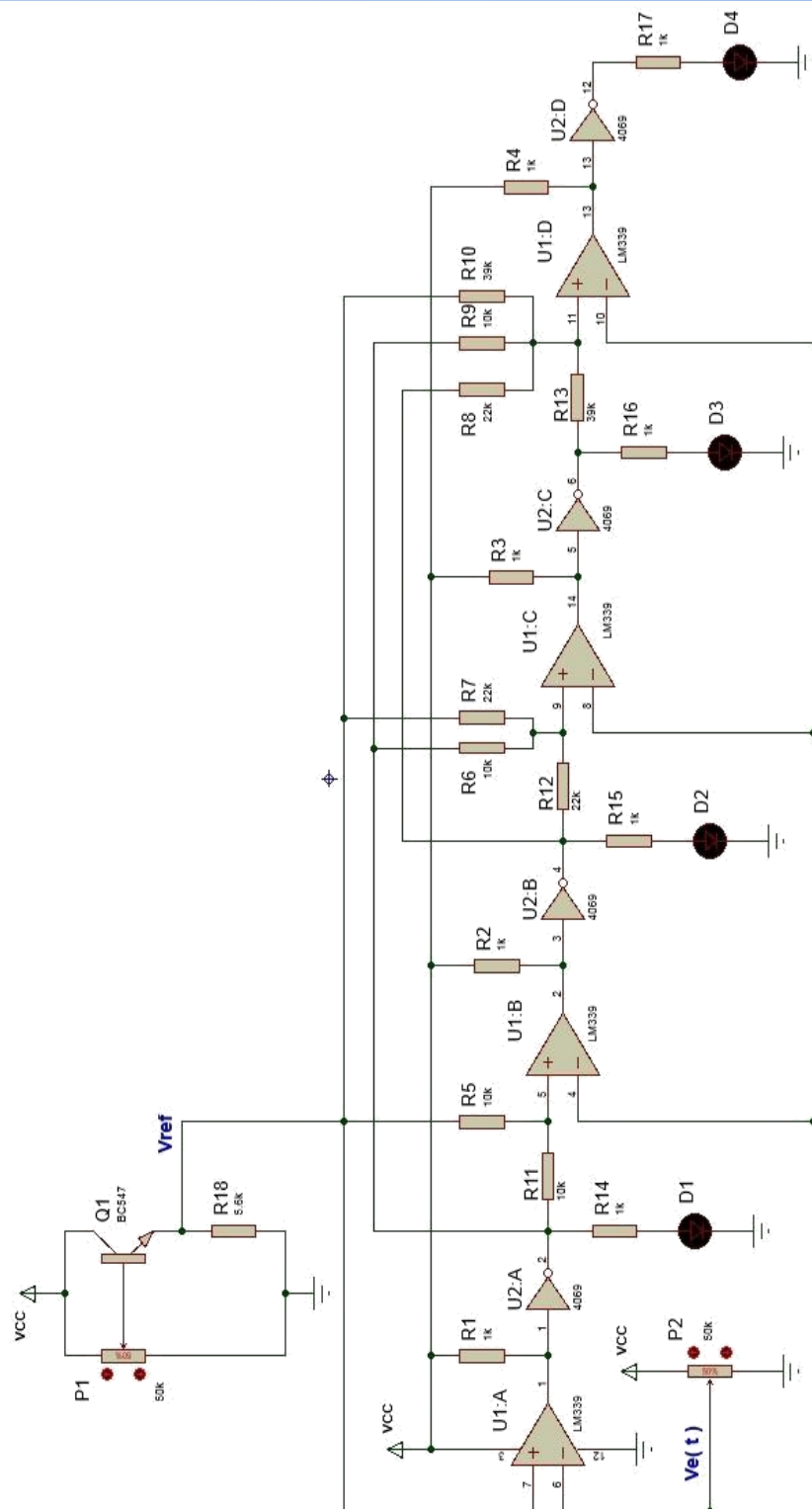
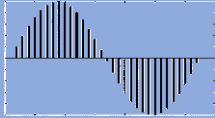


Figura 2.2



Laboratorio de Control Digital

Práctica 3

Convertidor Digital Analógico Integrado



Tema

4. Diseño de sistemas de control digital a partir de funciones de transferencia discretas

Objetivos

- El alumno comprobará el funcionamiento de un convertidor digital analógico integrado que emplea el método de conversión de red de escalera R-2R.
- El alumno empleará el convertidor digital analógico MC1408 para generar señales analógicas a partir de circuitos digitales.

Introducción

Un convertidor digital analógico (CDA) es un dispositivo que transforma un dato binario de "n" bits en un voltaje analógico $V_s(t)$, el cual es directamente proporcional a la entrada digital, la salida generalmente se obtiene a través de una corriente que puede ser transformada posteriormente a voltaje.

El voltaje analógico obtenido en la salida tiene la característica de no ser continuo en amplitud pues su variación se realiza en escalones discretos de voltaje debido a que la entrada digital solo tiene un número finito de combinaciones para "n" bits con lo cual se tendrán a la salida 2^n posibles valores analógicos de voltaje.

Para realizar los procesos de conversión digital analógico se emplean una serie de métodos que generalmente incluyen amplificadores operacionales para sumar voltajes o corrientes proporcionales a cada uno de los bits que conforman al número binario de entrada, es por eso por lo que a estos métodos se les denomina de corrientes o voltajes ponderados.

Estos dispositivos CDA se emplean para interconectar a los sistemas digitales con los procesos reales que requieren señales analógicas para su funcionamiento.

El convertidor digital analógico integrado que se empleará en esta práctica es el MC1408 que tiene un largo de palabra de 8 bits y emplea el método de conversión de red de escalera R-2R con salida de corriente.

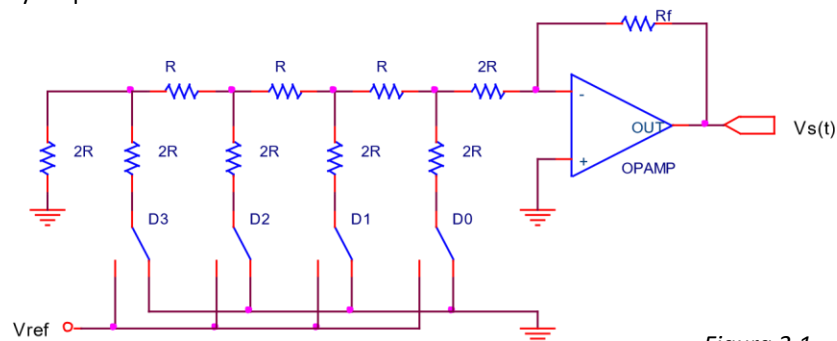


Figura 3.1

En la práctica se utilizará un circuito contador binario natural de 8 bits que proporcionará la entrada digital al convertidor y este generará una señal rampa negativa que se invertirá a través de un amplificador operacional convertidor de corriente a voltaje.

Material

- 1 C.I. MC1408 Convertidor Digital Analógico.
- 1 C.I. 74LS393.
- 1 C.I. LM741.
- 1 Resistencia de $4.7\text{ K}\Omega$ a $\frac{1}{2}\text{ W}$.
- 1 Resistencia de $1\text{ K}\Omega$ a $\frac{1}{2}\text{ W}$.
- 1 Potenciómetro de $50\text{ K}\Omega$.
- 1 Capacitor de 1 nF .

Equipo

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

Actividades previas a la realización de la práctica

1. El alumno realizará la lectura de la práctica.
2. Explique el concepto de conversión digital analógico a través del método R-2R.
3. Explique el concepto de conversión digital analógico con el método de resistencias ponderadas.
4. Entregue a su profesor al inicio de la práctica las actividades previas.

Procedimiento Experimental

1. Implemente el circuito de la figura 3.2 y obtenga la señal diente de sierra positiva generada en la salida del convertidor.

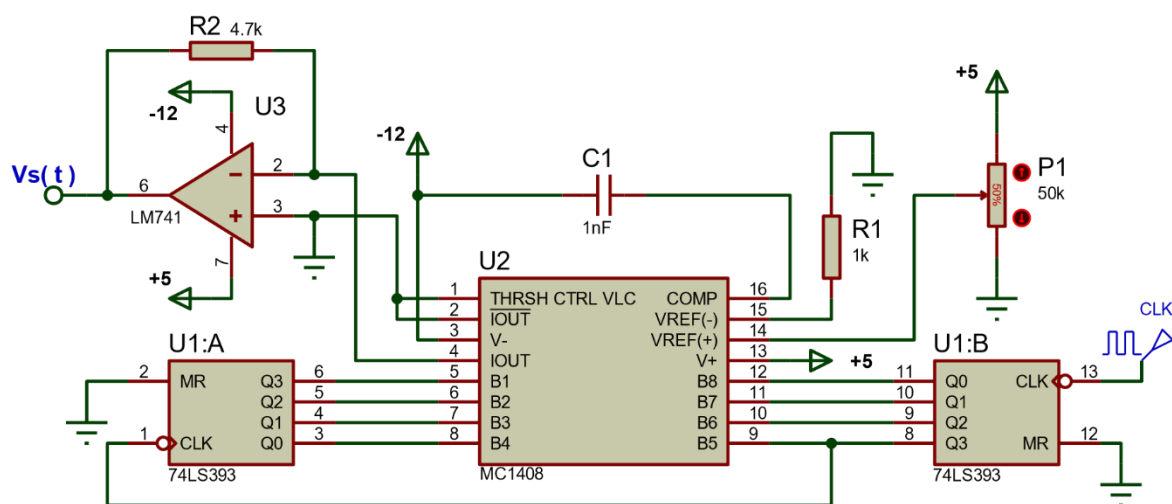


Figura 3.2

- La señal de reloj (terminal 13 del contador), es una **señal cuadrada de 10KHz, 5Vpp de amplitud y no debe tener parte negativa.**

Esto se puede lograr obteniendo dicha señal de la salida del generador de pulsos TTL o de la salida normal del generador de funciones, pero agregándole un offset de 2.5V, para que siempre este sobre el nivel de tierra.

- Pruebe el funcionamiento del circuito verificando:
 - Funcionamiento del contador binario considerando que el bit del pin 12 es el menos significativo.
 - La generación de la señal diente de sierra positiva en la terminal 6 del Amplificador Operacional.
- Ajuste el potenciómetro P1 hasta tener una amplitud de 4 V de voltaje pico, en la señal diente de sierra, como se muestra en la figura 3.3, si no se logra alcanzar el nivel de voltaje indicado, sustituya la resistencia de realimentación del operacional para lograr obtener dicho valor.

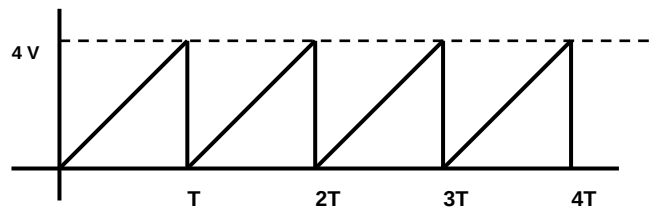


Figura 3.3 Señal Diente de Sierra positiva

- Modifique el circuito de la figura 3.2 eliminando las conexiones de las terminales B8 a B4 del convertidor de tal forma que se genere una señal de 100 Hz y con un voltaje pico de 4 V como la mostrada en la figura 3.4.
- Realice la simulación del circuito modificado para obtener la salida de escalera mostrada en la figura 3.4.

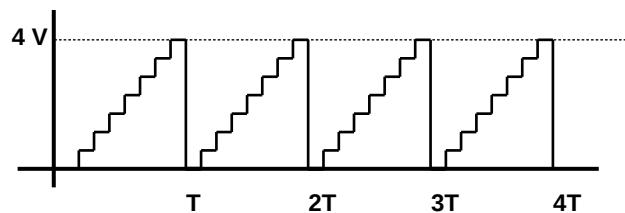


Figura 3.4 Señal Escalera

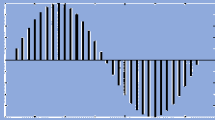
- Explique el efecto que tuvo la eliminación de esas terminales en la forma de onda y en el número de escalones.
- Explique por qué se dejaron conectados los bits B3, B2 y B1 para generar este tipo de señal y no otro grupo de 3 bits o bits no consecutivos.

Cuestionario

- Como es el tiempo de conversión del circuito para diferentes valores de entrada digitales y justifique su respuesta.
- ¿Qué rango de cuantización tiene el convertidor usado considerando los límites de entrada digitales y el voltaje de salida del circuito? Calcúlelo empleando la fórmula de cuantización.
- Mencione que modificaciones deberían hacerse en el circuito para obtener una señal como la mostrada en la figura 3.5.



Figura 3.5 Señal Triangular



Laboratorio de Control Digital

Práctica 4

Convertidor Analógico Digital con Realimentación



Tema

5.3. Realimentación de la salida

Objetivos

- Construir un convertidor analógico digital realimentado, empleando un convertidor digital analógico.
- Comprender el funcionamiento de las etapas que lo componen.

Introducción

De entre los métodos empleados para realizar la conversión CAD, uno de los más comunes es el método de rampa digital, el cual emplea un convertidor CDA que transforma el código binario de salida de un contador en una rampa discreta que es realimentada hacia la entrada del circuito y comparada contra el voltaje analógico de entrada que se desea convertir.

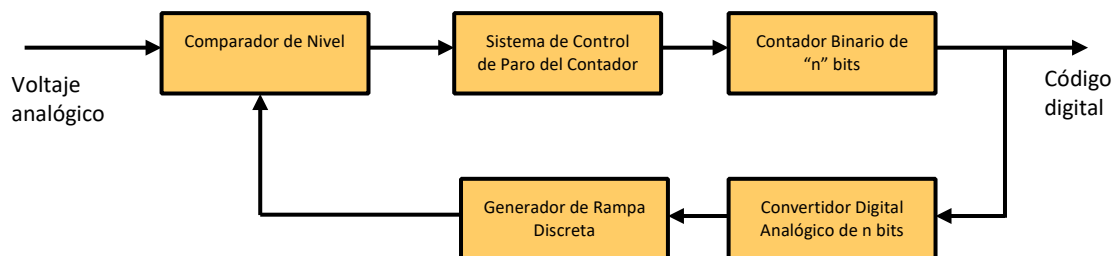


Figura 4.1

El circuito consta de un contador binario ascendente que genera una cuenta binaria con 2^n combinaciones para "n" bits de conversión, en la realimentación se cuenta con un CDA que convierte la cuenta binaria en una rampa discreta, la cual será invertida y amplificada para acondicionarla al nivel adecuado y de acuerdo al rango máximo del voltaje de entrada que se va a convertir.

A través de un comparador se determina el instante en que la rampa discreta alcanza al nivel del voltaje de entrada analógico y produce un pulso bajo en su salida que inhibe a la compuerta lógica NAND evitando que la señal de reloj llegue al circuito de conteo y por lo tanto, el contador digital se detiene.

El número digital presente en los leds de salida, representa el número de pulsos necesarios para que la rampa digital alcance el voltaje analógico de entrada y por lo tanto la conversión digital de dicho voltaje.

Es importante hacer notar que una vez que se detiene el contador por la inhibición del reloj, el contador deberá inicializarse para poder realizar otra conversión, puesto que la rampa deberá comenzar nuevamente desde cero.

Material

- 1 C.I. LM339 Comparador de Voltaje
- 1 C.I. MC1408 Convertidor Digital Analógico
- 1 C.I. LM741 Amplificador Operacional
- 1 C.I. 74LS393 Contador Binario
- 1 C.I. 74LS00 Compuerta NAND 3
- Resistencias de 1 K Ω a ½ W.
- 1 Resistencia de 0.47 K Ω a ½ W.
- 1 Resistencia de 4.7 K Ω a ½ W.
- 2 Potenciómetros de 50 K Ω .
- 1 Capacitor de 1 nF.
- 1 Push Button normalmente abierto 1
- Barra de 8 o 10 Leds.

Equipo

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

Actividades previas a la realización de la práctica

1. El alumno realizará la lectura de la práctica.
2. Explique el funcionamiento del método de conversión analógico digital de rampa discreta empleado en esta práctica.
3. Explique el método de conversión de doble rampa.
4. Entregue las actividades previas a su profesor al inicio de la práctica.

Procedimiento Experimental

1. Implemente el circuito de la figura 4.2.
2. Pruebe el funcionamiento del circuito por partes comenzando a partir de la compuerta NAND.
3. Para realizar estas pruebas elimine la conexión entre el comparador y la terminal 2 de la NAND, conecte la terminal 2 de la NAND a 5 V, y posteriormente compruebe:
 - La operación de la NAND como inversor.
 - La operación correcta del contador en forma ascendente.
 - La generación de la señal rampa discreta en la salida del LM741, ajustando el potenciómetro P2 hasta obtener una señal rampa sin deformaciones con una amplitud de 10 V.
 - La operación del comparador para diferentes niveles de entrada en V_e (potenciómetro P1), considerando un rango de 0 a 10 V.
 - Finalmente reconecte la terminal 2 de la NAND a la salida del comparador.
4. Pruebe el funcionamiento total del circuito.
5. Genere la tabla y la curva de cuantización indicando el valor del voltaje de entrada analógico (V_e), el código binario generado por el circuito y el código teórico. Obtenga 16 mediciones distribuidas en todo el rango de voltaje de entrada.
6. Después de tomar cada lectura borre la información de salida presionando el botón.

7. Comente acerca de los errores que presenta el circuito en cuanto a linealidad, exactitud y errores del proceso de conversión.

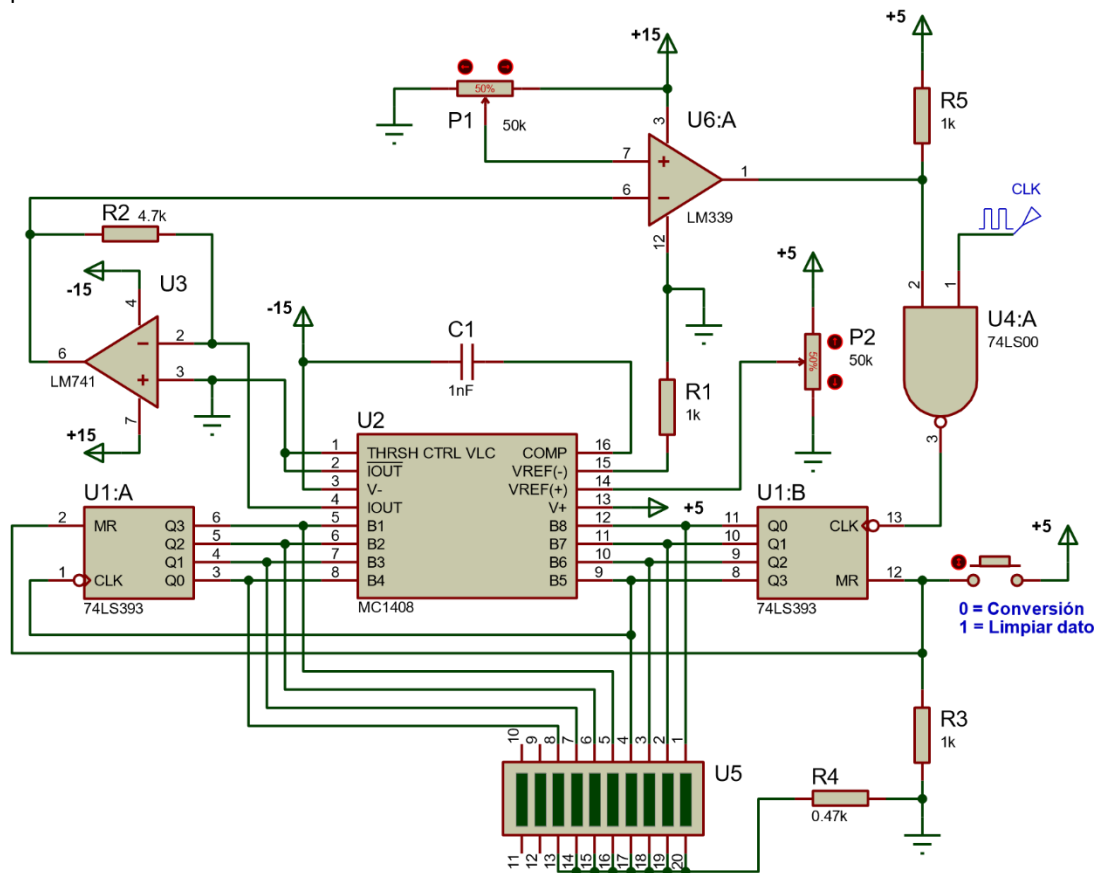
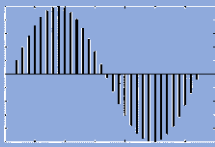


Figura 4.2

Cuestionario

1. Cuál es el rango de cuantización y el error máximo que puede presentarse en este circuito.
2. Explique de que depende el tiempo que le toma al circuito realizar la conversión.
3. Calcule el tiempo mínimo y el tiempo máximo que emplearía el sistema de la figura 4.2 para realizar la conversión.
4. Indique 2 formas con las cuales se puede reducir el tiempo promedio de conversión del circuito.
5. Que sucedería si el voltaje de entrada fuera mayor que el voltaje máximo alcanzado por la rampa discreta.



Laboratorio de Control Digital

Práctica 5

Control de Velocidad de Motor de CD por modulación PWM



Tema

6.3. Sensores, actuadores y dispositivos auxiliares

Objetivos

- El alumno implementará un control de velocidad para un motor de CD por medio de un modulador por ancho de pulsos, PWM.
- El alumno comprobará la variación del voltaje medio y la corriente media de una señal PWM.

Introducción

En el diseño de los sistemas de control digital convergen muchas de las disciplinas del área electrónica puesto que se requiere el empleo de los sensores, los actuadores y otros dispositivos que permitan llevar a la práctica tanto los algoritmos de control como las interfaces de potencia.

Uno de los dispositivos que con mayor frecuencia se utiliza en los sistemas de control es el motor de CD, el cual se emplea para realizar control de posición o de velocidad.

La forma tradicional de control de velocidad para motores de CD era la variación del nivel de alimentación de voltaje como se muestra en la figura 5.1, pero se tiene la desventaja de que, a niveles de voltaje pequeños, se reduce significativamente el torque del motor, además siempre se presenta una “zona muerta” debido a la inercia del rotor, entre más grande es el motor, más grande es la zona muerta.

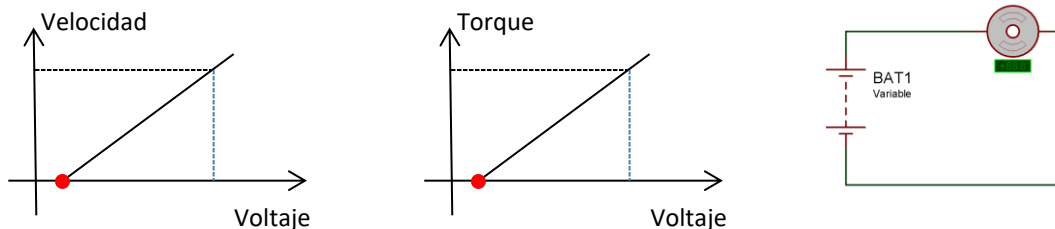


Figura 5.1

Otro punto importante es que, si queremos controlar el motor a través de sistemas digitales, la variación directa de voltaje tiene algunos problemas de implementación ya que se tendría que proporcionar a través de convertidores CDA y etapas de potencia.

Para controlar la velocidad de estos motores a través de sistemas de control digital se empleaba el método de control directo por nivel de alimentación de CD, en este método se emplea una señal de solo 2 niveles que activa e inactiva el motor, tal como se muestra en la figura 5.2.

Proporcionando un control de velocidad limitado ya que el motor solo puede girar a una sola velocidad y su control solo podía lograrse con controladores ON – OFF que se activaban por un tiempo predeterminado.

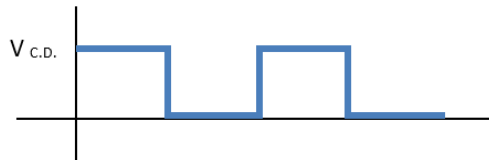


Figura 5.2 Señal de 2 niveles discretos

En forma más reciente se emplea la modulación por ancho de pulso PWM (Pulse Width Modulation) la cual utiliza el mismo tipo de señal pero el ancho de activación es variable, lo cual produce una variación en el voltaje medio aplicado al motor de CD y por lo tanto funciona como una variación en el nivel de CD de la señal como se muestra en la figura 5.3.



Figura 5.3 Señal de 2 niveles discretos con PWM

Material

- 1 C.I. LM358
- 1 C.I. LM339
- 1 C.I. LM741
- 1 Transistor TIP31A
- 1 Diodo rectificador 1N4001
- 2 Diodos Zener 1N4731
- 2 Potenciómetros de 20k Ω
- 2 Resistencias de 10k Ω a ½ watt
- 3 Resistencias de 1k Ω a ½ watt
- 1 Resistencia de 47 Ω a ½ watt
- 2 Capacitores de 0.1 μ F
- 1 Motor de CD de 12V

Equipo

- 1 Fuente de voltaje bipolar
- 1 Osciloscopio
- 1 Multímetro

Actividades previas a la realización de la práctica

1. El alumno realizará la lectura de la práctica.
2. Explique el concepto de modulación por ancho de pulso PWM.
3. Investigar las ecuaciones de funcionamiento de un oscilador de onda cuadrada como el mostrado en la parte izquierda del circuito de la figura 5.4.
4. Entregue las actividades previas a su profesor al inicio de la práctica.

Procedimiento Experimental

1. Implemente el circuito que se muestra en la figura 5.4 teniendo cuidado de polarizar correctamente los amplificadores operacionales.

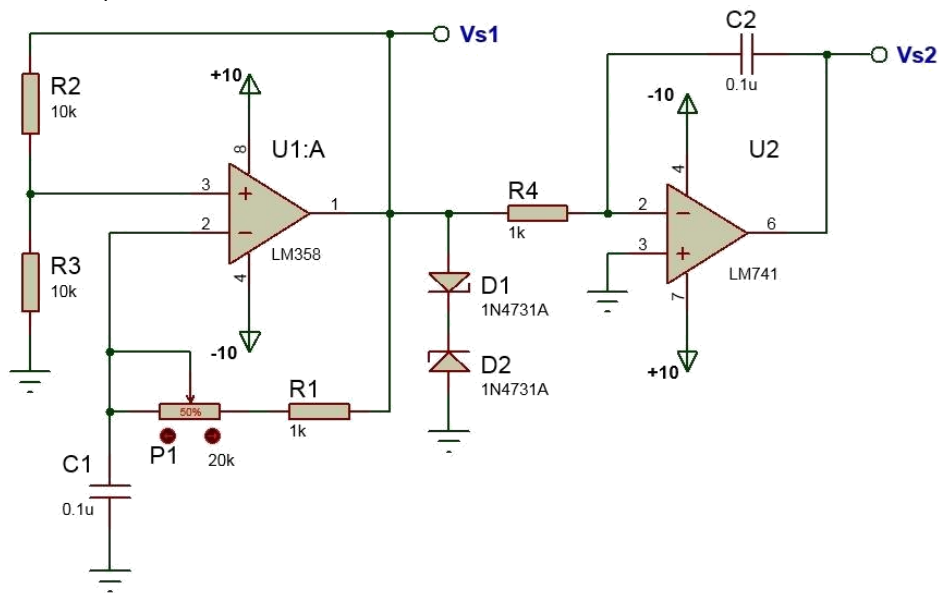


Figura 5.4

2. Utilizando el canal A del osciloscopio en acoplo de CD, mida el voltaje **Vs1** y compruebe el funcionamiento apropiado del circuito oscilador.
3. Usando el canal B del osciloscopio, también en acoplo de CD, observe la señal de salida **Vs2** y compárela con la señal del circuito oscilador. Dibuje ambas señales en una sola gráfica, acotando sus niveles de voltaje y frecuencia. No olvide anotar sus comentarios.
4. Ajuste la frecuencia de la onda de salida **Vs1** a 2kHz por medio del potenciómetro P1.
5. Implemente el circuito de la figura 5.5 y use como señal de entrada la salida **Vs2**.

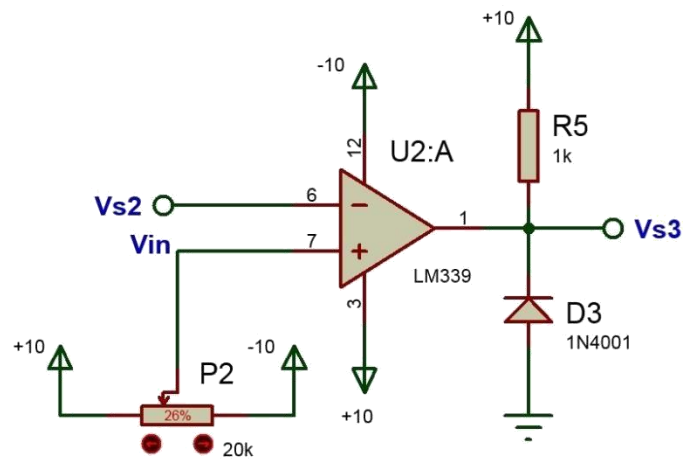


Figura 5.5

6. Mida y dibuje la señal de salida **Vs3**, varíe el nivel de voltaje de CD de entrada por medio del potenciómetro P2 y observe las variaciones de la salida. Anote sus comentarios explicando el comportamiento de dicha señal.

7. Adicione la resistencia R6, el transistor Q1 y el motor de CD para obtener el circuito total que se muestra en la figura 5.6.

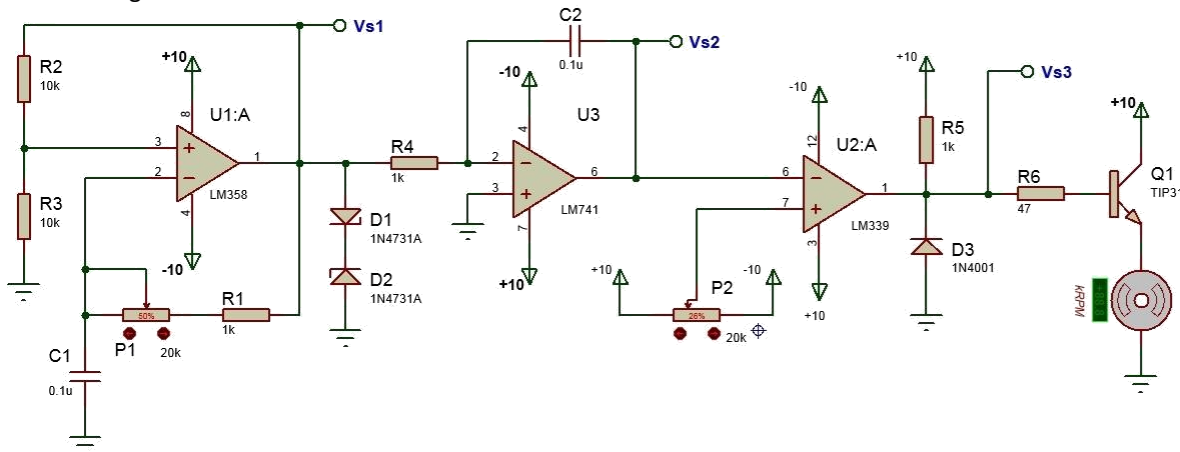
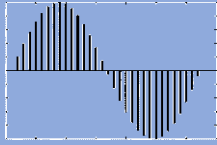


Figura 5.6

8. Reduzca el voltaje de entrada de CD del potenciómetro P2 hasta cero y aumentelo poco a poco hasta obtener el voltaje mínimo de arranque del motor.
9. Haciendo uso del multímetro, mida el voltaje y la corriente promedios suministrados al motor en el momento del arranque.
10. Repita el punto anterior pero esta vez obtenga los datos de velocidad máxima de giro del motor.
11. Observando la señal **Vs3** en el osciloscopio y variando el potenciómetro P2 registre el comportamiento del voltaje medio alimentado al motor de CD.
12. Explique la relación que existe entre la variación de la anchura de la señal PWM con el voltaje medio alimentado al motor de CD.

Cuestionario

1. Determine la función de transferencia del circuito integrador mostrado en la parte derecha de la figura 5.4 y calcule su frecuencia de corte.
2. En base a la frecuencia de operación que se indica en el punto 4 del desarrollo, determine la ganancia de voltaje del amplificador integrador utilizado.
3. Describa las características de una señal de tipo PWM y sus usos más comunes.
4. Explique, ¿qué función cumple el transistor empleado en el circuito? y mencione la manera en que opera.
5. ¿Qué sucedería si se retirara el diodo rectificador del circuito? Utilice una gráfica donde describa este nuevo comportamiento.
6. Que función realizan los 2 diodos Zener colocados a la salida del oscilador.



Laboratorio de Control Digital

Práctica 6

Motor de Pasos



Tema

6.4. Ejemplos de aplicación

Objetivos

- Diseñar un sistema digital implementado con elementos discretos para controlar un motor de pasos.
- Controlar la velocidad, sentido de giro y posición angular.

Introducción

El motor de pasos, figura 6.1, es un dispositivo capaz de transformar pulsos eléctricos digitales en un movimiento rotacional discreto de su eje, por cada pulso insertado el motor gira un ángulo fijo, establecido por el número de bobinas del estator, el tipo de motor y la secuencia de alimentación de dichas bobinas.



Figura 6.1

El ángulo de rotación del eje es directamente proporcional al número de pulsos insertados a las bobinas y la velocidad de rotación es dependiente de la frecuencia de dichos pulsos. Los motores por pasos son simples de operar en una configuración de lazo abierto y debido a su tamaño proporcionan un excelente torque a baja velocidad.

El resultado de este movimiento es un posicionamiento preciso y confiable ya que hay una relación directa entre el número de pulsos insertados y el ángulo de giro del motor.

En los sistemas de control moderno se presentan a menudo movimientos de tipo incremental, por esto los motores de pasos se han convertido en elementos de acción importantes y en la actualidad podemos encontrar estos motores en unidades de disco flexible, unidades de disco duro, impresoras, en gran variedad de máquinas herramientas y son dispositivos fundamentales para proporcionar movimiento a los robots.

Un motor de pasos puede ser comparado con una serie de electromagnetos o solenoides dispuestos en círculo como se muestra en la figura 6.2.

Cuando se energizan los electromagnetos secuencialmente, se crea un campo magnético que ocasiona una reacción de orientación del rotor con los polos del electroimán, lo cual hace girar al rotor en el sentido de la

activación de los campos magnéticos hasta alcanzar una posición de alineación con el campo magnético generado, permaneciendo en la posición de alineación hasta que se active otro campo magnético adyacente. Este tipo de motores tiene un ángulo de paso, el cual está determinado por el fabricante y nos indica cual va a ser el desplazamiento angular del rotor al aplicarle un pulso, los ángulos de paso más comunes van desde 0.9° por pulso hasta 15° por pulso en los motores más simples.

En nuestro caso el motor utilizado tiene un ángulo de paso de 15° por pulso, es decir que es necesario dar 24 pulsos para tener una revolución completa.

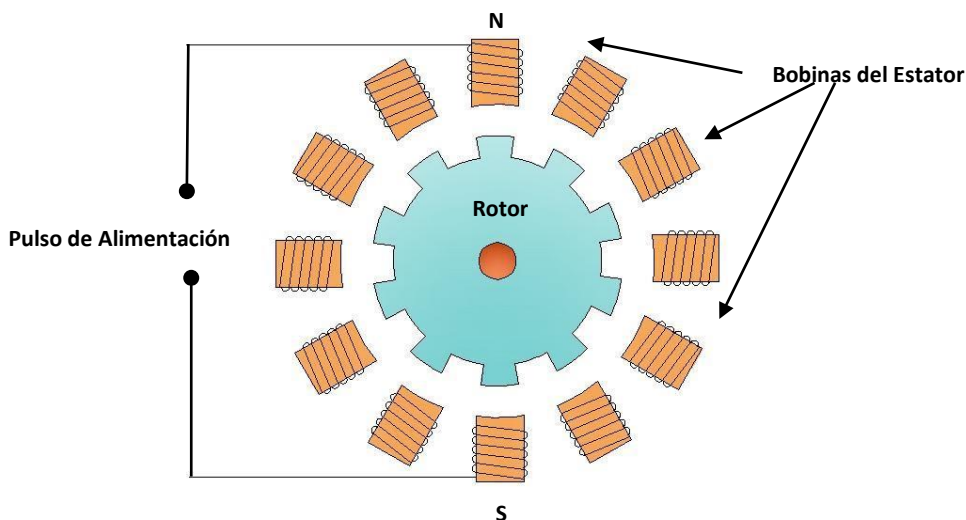


Figura 6.2

Material

- 3 Resistencias de $56\ \Omega$ a $\frac{1}{2}\text{ W}$.
- 3 Diodos 1N4001
- 3 Transistores TIP31
- 1 Motor de pasos
- Elementos necesarios para la implementación del diseño.

Equipo

- 1 Fuente de voltaje.
- 1 Multímetro
- 1 Osciloscopio

Actividades previas a la realización de la práctica

1. El alumno realizará la lectura de la práctica.
2. El alumno diseñará un circuito secuencial digital que genere una secuencia como la mostrada en la figura 6.3 considerando que la frecuencia de los pulsos debe ser variable, de modo que haga girar al motor de manera continua y con velocidad variable.
3. El circuito digital generado deberá ser diseñado solo con circuitos lógicos discretos tales como: compuertas, flip-flops, multiplexores, etc., **no se aceptarán diseños realizados con dispositivos lógicos programables** tales como: Memorias, PIC's, PICAXE, Arduino, Gal's, etc.

Los valores de las señales son TTL.

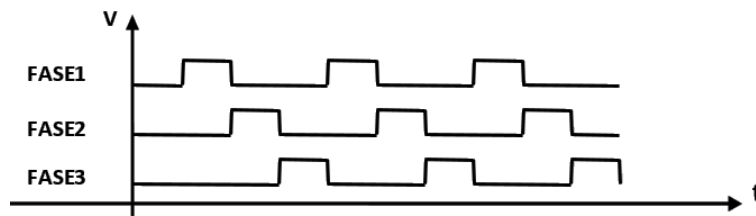


Figura 6.3

Procedimiento Experimental

1. Implemente la etapa de potencia mostrada en la figura 6.4, la cual sirve para proporcionar la corriente necesaria a las bobinas del motor de pasos a partir de las señales digitales de baja potencia.
2. Conecte las 3 salidas del circuito diseñado a las 3 fases de la etapa de potencia.
3. Conecte los 3 colectores de la etapa de potencia a cada una de las 3 bobinas del motor de pasos y conecte el cuarto cable (cable negro) al voltaje de 12V como se muestra en la figura 6.5.
4. Pruebe el funcionamiento correcto del motor de pasos.
5. Visualice en el osciloscopio tres fases consecutivas del motor y grafique ambas señales, anotando el valor del periodo para una frecuencia de reloj de 10 Hz del circuito secuencial.
6. Aumente la velocidad de giro hasta que el motor pierda la sincronía y anote el valor de la frecuencia de entrada y el periodo de la señal de una de las fases donde se produce ese efecto.
7. Modifique el circuito para que el motor gire solamente una vuelta completa (24 pulsos) cuando se le indique a través de una señal de inicio.
8. Entregar la información correspondiente al diseño, implementación, material y pruebas realizadas sobre los circuitos diseñados.

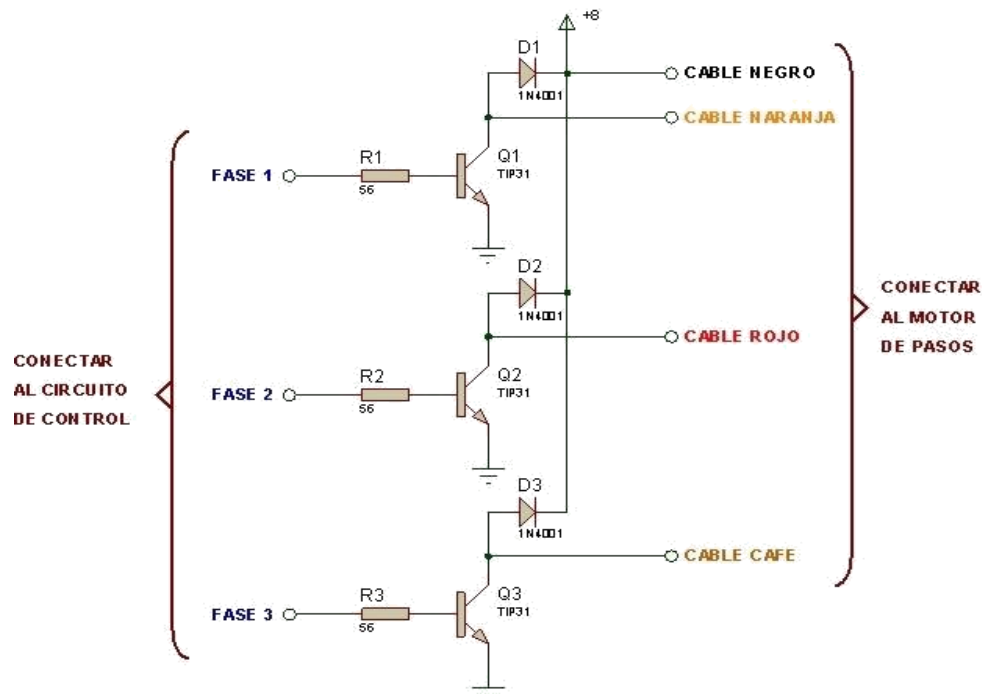


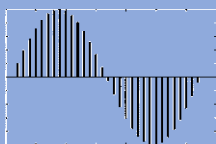
Figura 6.4



Figura 6.5

Cuestionario

1. En forma de bloque explique los elementos básicos que debe tener un circuito de control que permita al usuario establecer el número de pulsos específico que desee hacer girar al motor, esto es, los elementos para construir un controlador de posición angular.
2. Calcule la velocidad angular máxima del motor en función del periodo medido para una de las fases y el número de pulsos necesarios para dar una vuelta.
3. Investigar en los manuales de circuitos integrados lineales de diversos fabricantes, un circuito que realice la función de controlador de motor de pasos e incluir en el reporte copias de las especificaciones.
4. Investigue los diferentes tipos de motores de pasos, indicando sus características y su forma de funcionamiento.



Laboratorio de Control Digital

Práctica 7

Análisis y Simulación de Sistema Digital con Matlab



Tema

6.4 Ejemplos de aplicación

Objetivos

- Deducir el comportamiento de la función de transferencia de un motor de CD controlado por armadura.
- Obtener la función de transferencia de un controlador de posición angular con un motor de CD.
- Analizar y simular el comportamiento de un sistema de control digital empleando las herramientas de Matlab.
- Comprobar el funcionamiento del controlador proporcional $G_{cp}(z)$ en el dominio de Z .

Introducción

En esta práctica se empleará un simulador matemático para realizar la implementación de un sistema de control al cual se le pueda agregar un controlador proporcional para comprobar los conceptos teóricos de compensación y sintonización de los controladores digitales.

Los simuladores de software constituyen en la actualidad una herramienta muy poderosa para la comprensión de conceptos y adquisición de conocimientos y así poder aplicar éstos a nuevos contextos, a los que, por diversas razones, el estudiante no puede acceder desde el contexto donde se desarrolla su aprendizaje.

De hecho, buena parte de la ciencia de frontera se basa cada vez más en el paradigma de la simulación, más que en el experimento en sí. Mediante los simuladores se puede, por ejemplo, desarrollar experimentos de química en el laboratorio de informática con mayor seguridad.

Los simuladores usados en educación se definen como programas que contienen un modelo de algún aspecto del mundo y que permite al estudiante cambiar ciertos parámetros o variables de entrada, ejecutar o correr el modelo y desplegar los resultados (Escamilla, 2000). Hoy en día, las actuales tecnologías han cambiado al aparecer nuevos soportes, como el magnético y el óptico; la información ahora es digitalizada: se pasa del lápiz y el papel al teclado y la pantalla y, aún más, a la simulación (Rosario, 2005).

Aunque las investigaciones sobre simulación son todavía muy escasas, se pueden encontrar experiencias que desarrollan procesos de enseñanza-aprendizaje con simuladores; mediante la integración de las tecnologías de telecomunicaciones por computadora con instrumentación virtual se han desarrollado laboratorios de física disponibles para ingeniería y accesibles a través de la red en tiempo real, lo cual asegura una rica experiencia de aprendizaje para el estudiante. Ellos toman en cuenta las limitaciones reales de los laboratorios, tales como el aprovechamiento de tiempo, los costos de instrumentación y los gastos de operación, la falta de personal, y la disponibilidad de laboratorio en horario diferente al de oficina (Macías, 2007).

Tomando en cuenta estos hechos, en esta práctica se realizará el planteamiento de la función de transferencia de un sistema físico, su análisis y parámetros de funcionamiento y posteriormente la inclusión de un

controlador digital que permita modificar el comportamiento de la respuesta y comprender así los procesos de compensación y sintonización de los controladores.

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.

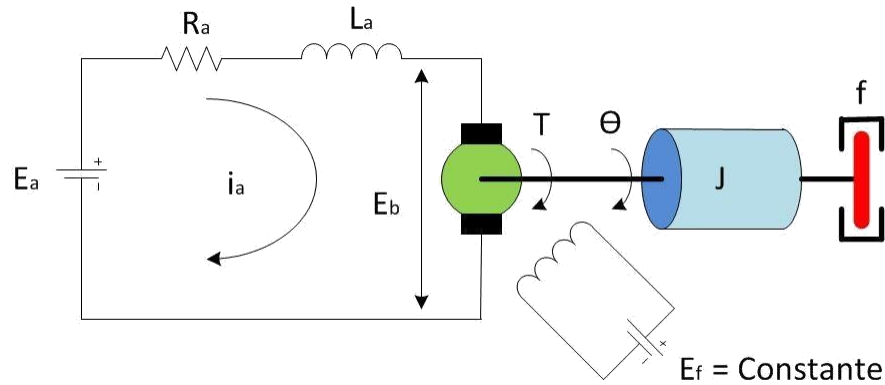


Figura 7.1

Que queda definido por las siguientes ecuaciones:

$$T = K_f i_f K_1 i_a \quad (7.1)$$

Donde K_1 es una constante e i_f se mantiene constante debido a que el voltaje de alimentación del campo es constante y por lo tanto el flujo es constante en el estator, de manera que:

$$T = K i_a(t) \quad (7.2)$$

Donde K es una constante del par motor. Cuando el rotor está en movimiento se induce un voltaje E_b que es directamente proporcional a la velocidad angular del motor, donde K_b es una constante de fuerza contraelectromotriz.

$$E_b = K_b \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (7.3)$$

En un motor de CD controlado por armadura la velocidad del motor se controla a través de la tensión en el rotor E_a , la cual se relaciona con la malla eléctrica a través de la ecuación:

$$L_a \frac{di_a(t)}{dt} + R_a i_a(t) + E_b = E_a \quad (7.4)$$

La corriente de la armadura produce un par T que se aplica a la inercia y a la fricción del rotor, por lo tanto:

$$J \frac{d^2 \theta(t)}{dt^2} + f \frac{d\theta(t)}{dt} = T = K i_a(t) \quad (7.5)$$

Suponiendo que todas las condiciones iniciales son nulas y tomando la transformada de Laplace de las ecuaciones anteriores se tiene:

$$K_b S \Theta(s) = E_b(s) \quad (7.6)$$

$$(L_a S + R_a) I_a(s) + E_b(s) = E_a(s) \quad (7.7)$$

$$(J S^2 + f S) \Theta(s) = T(s) = K I_a(s) \quad (7.8)$$

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

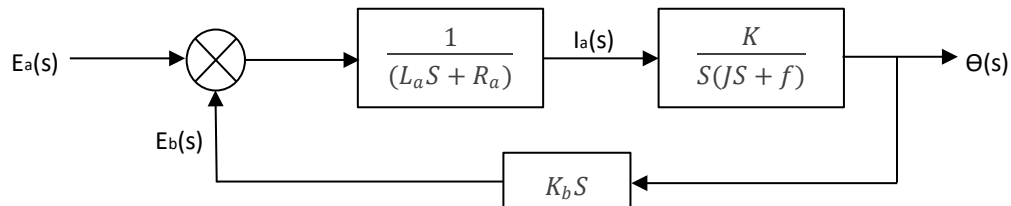


Figura 7.2

Que proporciona una función de transferencia:

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

Donde:

K = Constante de par motor = $6 \cdot 10^{-5}$ lb-ft/A

L_a = Inductancia del devanado del inducido = 10 mH

J = Inercia equivalente referida al eje del motor a través del tren de engranes = $5.4 \cdot 10^{-5}$ lb-ft-s²

f = Fricción viscosa equivalente referida al eje del motor a través del tren de engranes = $4 \cdot 10^{-4}$ lb-ft/rad/s

R_a = Resistencia del devanado del rotor = 0.2 Ω

K_b = Constante de fuerza contraelectromotriz = $5.5 \cdot 10^{-2}$ V-s/rad

Con esta planta se puede construir un sistema de control de posición realimentado considerando un potenciómetro de entrada que produce una referencia R , un amplificador diferencial con ganancia K_p igual a 10 como elemento de comparación y un potenciómetro de salida que gira a la posición deseada C .

La figura 7.3 muestra el sistema de control de posición.

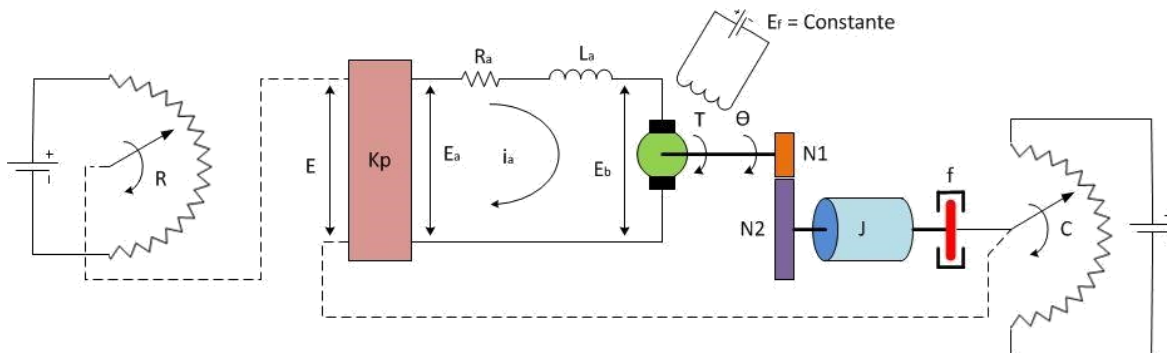


Figura 7.3

Las ecuaciones que describen la dinámica del sistema de potenciómetro y el amplificador son las siguientes:

$$E(s) = K_r[R(s) - C(s)] \quad (7.10)$$

$$E_a(s) = K_p E(s) \quad (7.11)$$

$$C(s) = \frac{N_1}{N_2} \theta(s) \quad (7.12)$$

Y se tiene finalmente un diagrama de bloques del sistema realimentado como se muestra en la figura 7.4.

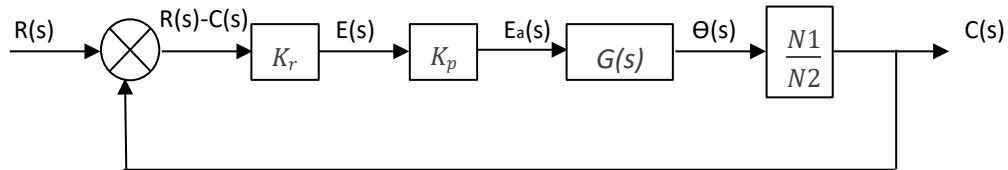


Figura 7.4

Donde:

K_r = Ganancia del detector de error potenciométrico = $24/\pi$ V/rad

K_p = Ganancia del amplificador diferencial = 10

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

Equipo

- 1 Computadora con sistema operativo Windows y con el simulador MATLAB instalado

Actividades previas a la realización de la práctica

1. El alumno realizará la lectura de la práctica.
2. El alumno investigará los conceptos de: función de transferencia, polos y ceros, lugar geométrico de las raíces, controlador proporcional (P), compensación de sistemas y sintonización de controladores.
3. El alumno entregará los resultados de las actividades previas al profesor al inicio de la práctica.

Procedimiento Experimental

1. Iniciar el programa Matlab.
2. Para la realización del reporte realice una captura de los comandos en la pantalla del programa Matlab o una copia de las gráficas generadas e inclúyalas dentro del desarrollo
3. Insertar los valores de los coeficientes de la función de transferencia $G(s)$ de la figura 7.3 a través de los comandos:

`K=6E-5`

`La=10E-3`

`J=5.4E-5`

`f=4E-4`

`Ra=0.2`

`Kb=5.5E-2`

4. Defina la variable de Laplace “s” con el comando:

```
s=tf('s')
```

5. Inserte la función de transferencia G(s) con el comando:

```
G=K/(s*(La*J*s^2+(La*f+Ra*J)*s+(Ra*f+K*Kb)))
```

6. Compruebe que los valores de las constantes se sustituyeron de manera correcta dentro de la función de transferencia a través del comando:

```
zpk(G)
```

7. Inserte las constantes del sistema de control de posición de lazo cerrado de la figura 7.4 y obtenga la función de transferencia de trayectoria directa (Gtd), considere que la realimentación es unitaria y por lo tanto la función de transferencia de lazo abierto (Gla) es igual a la de la trayectoria directa, a través del comando:

```
Kr=24/pi
Kp=10
n=1/10
Gtd=Kr*Kp*G*n
Gla=Gtd*1
```

8. Obtenga la función de transferencia de lazo cerrado (Glc) del sistema de control de posición a través del comando:

```
Glc=feedback(Gtd,1)
zpk(Glc)
```

9. Inserte un retenedor de orden cero en la trayectoria directa y transforme la función Gtd al dominio de Z considerando un periodo de muestreo de $T = 0.1$ s. a través del comando:

```
Gztd=c2d(Gtd,0.1,'zoh')
zpk(Gztd)
```

10. Obtenga la función de transferencia de lazo cerrado (Gzlc) del sistema de control de posición en el dominio de Z a través del comando:

```
Gzlc=feedback(Gztd,1)
zpk(Gzlc)
```

11. Identifique y escriba la ecuación característica del sistema de lazo cerrado en el dominio de Z.
 12. Determine la estabilidad absoluta del sistema empleando el criterio del círculo unitario indicando si el sistema es estable o no, con el comando:

```
pzmap(Gzlc,'r')
zgrid
```

13. Obtenga el error en estado estable utilizando el comando que determina el valor final de la función y restando el valor del escalón unitario que se utilizará de entrada.

```
eee=1-dcgain(Gzlc)
```

14. Obtenga la respuesta en el tiempo del sistema de lazo cerrado considerando una entrada escalón unitario con el comando siguiente y maximizando la ventana resultante. `step(Gzlc)`
15. En base a la gráfica obtenida determine el tipo de respuesta que tiene el sistema.
16. Determine los parámetros de funcionamiento denominados: tiempo pico (t_p), máximo sobreimpulso (M_p), tiempo de establecimiento (t_s), tiempo de subida (t_r), mostrándolos con el botón derecho del mouse sobre cualquier punto de la gráfica y seleccionando las opciones mostradas en la figura 7.5.

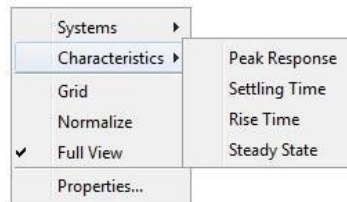


Figura 7.5

17. Obtenga el lugar geométrico de las raíces del sistema de lazo abierto ($Gzla$) con el siguiente comando:

```
rlocus(Gztd)
```

18. Determinar cuáles son los polos dominantes del sistema a través de la ecuación característica del sistema de lazo cerrado, anotando las coordenadas de dichos polos a través del comando:

```
pole(Gzlc)
```

19. Insertar un controlador proporcional en la trayectoria directa del sistema según se muestra en la figura 7.6. considerando que el valor del controlador es igual a $G_{cp}(z) = K_{cp}$. El programa Matlab considera la inclusión de una ganancia en la trayectoria directa de un sistema con realimentación y por lo tanto de manera implícita los comandos siguientes trabajan sobre dicha ganancia K_{cp} .

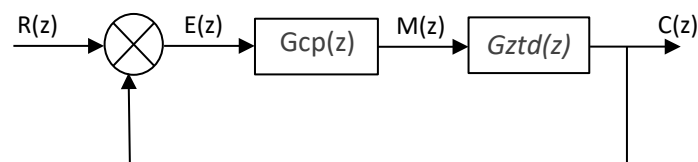


Figura 7.6

20. Determina el rango de estabilidad de la ganancia K_{cp} del sistema con el siguiente comando y determina si el sistema es estable, consulta el "help" del comando:

```
allmargin(Gztd)
```

21. Modifica el valor de la ganancia del sistema de acuerdo a la tabla siguiente y evalúa la respuesta en el tiempo para entrada escalón unitario para cada uno de los valores de ganancia considerando el diagrama con realimentación que se muestra en la figura 7.6. Para modificar explícitamente la ganancia de la función $Gztd(z)$ solamente debe multiplicar la ganancia por $Gztd$ y realizar la realimentación como se muestra en el siguiente comando:

```
G1=0.1 * Gztd
```



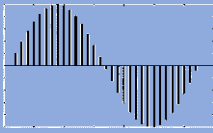
```
G1z1c=feedback(G1,1)
step(G1z1c)
```

Función	Ganancia del controlador proporcional (K)	Tipo de respuesta	Estabilidad	Error en estado estable
G1	0.1			
G2	0.2			
G3	0.24579			
G4	0.4			
G5	0.6			
G6	1			
G7	2			
G8	K máxima			

Tabla 7.1

Cuestionario

1. Analizando el error estable de las diferentes formas de respuesta del sistema justifique en base a la función de transferencia porque se tiene ese comportamiento.
2. Si el sistema de control de posición es de tercer grado, porque la respuesta se asemeja a la de un sistema de segundo grado.
3. Qué ventajas tiene la aplicación de un controlador proporcional a un sistema de control.



Laboratorio de Control Digital

Práctica 8

Filtros Digitales



Tema

- 4.1. Terminología de filtros digitales.
- 4.2. Ventajas y desventajas de los filtros digitales

Objetivos

- El alumno entenderá los fundamentos de los filtros digitales además de su funcionamiento básico.
- El alumno identificará los tipos de filtros digitales básicos además de determinar el orden los mismos.

Introducción

Un filtro se puede definir como un elemento o sistema que, de acuerdo con una característica definida, permite o no el paso de lo que se encuentra en su entrada hacia su salida. En términos de sistemas electrónicos, una señal eléctrica aplicada a la entrada del filtro solo podrá atravesarlo si cumple con una característica deseada, por ejemplo, una frecuencia determinada, de lo contrario dicha señal no podrá atravesar al filtro.



Figura 8.1. Estructura básica de un filtro.

Al tratarse de filtros que discriminan las señales de entrada en función de sus características frecuenciales, éstos se pueden clasificar en dos tipos básicos de acuerdo con la forma de su respuesta, filtros pasa bajas cuya respuesta se muestra en la figura 8.2(a) y filtros pasa altas con respuesta como la que se ve en la figura 8.2(b). A partir de estos dos filtros se pueden obtener otros de mayor complejidad con otro tipo de características.

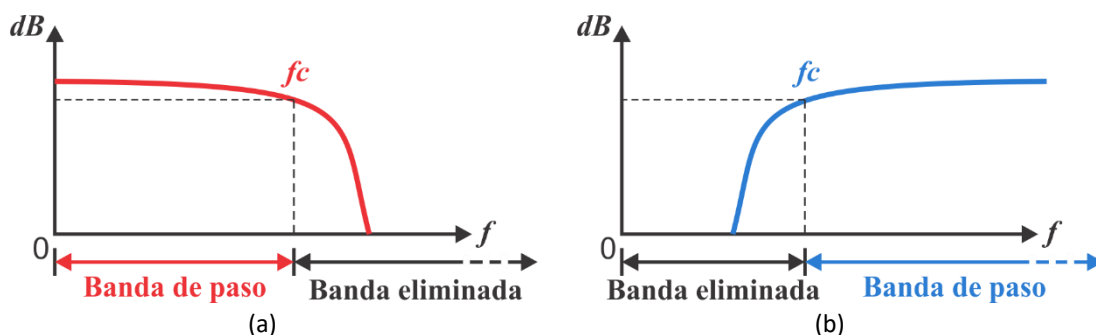


Figura 8.2. Respuesta frecuencial de filtros básicos.

Un filtro digital es un algoritmo, normalmente un programa en una computadora, que se aplica a una señal de entrada, dicha señal puede ser de naturaleza analógica pero que se debe transformar a una versión digital de la misma para poder ser tratada por el algoritmo del filtro, es decir, una señal discreta en el tiempo y en

amplitud que además ha sido cuantificada. El filtro digital genera una salida, también de tipo digital, de acuerdo con los valores numéricos correspondientes a las muestras de la señal analógica de entrada que fueron digitalizadas. Tanto los valores de las muestras de entrada como los de la salida del filtro digital pueden ser almacenados en la memoria de la computadora como un conjunto de valores definidos o ser enviados hacia el exterior para ser usados en el mundo físico. Lo anterior indica que un filtro digital normalmente está acompañado de elementos que permitan realizar las conversiones de las señales con las que trabaja, es decir, convertidores de tipo analógico-digital (ADC) en su entrada y convertidores digital-analógicos (DAC) en su salida, como se observa en el diagrama de bloques de la figura 8.3.

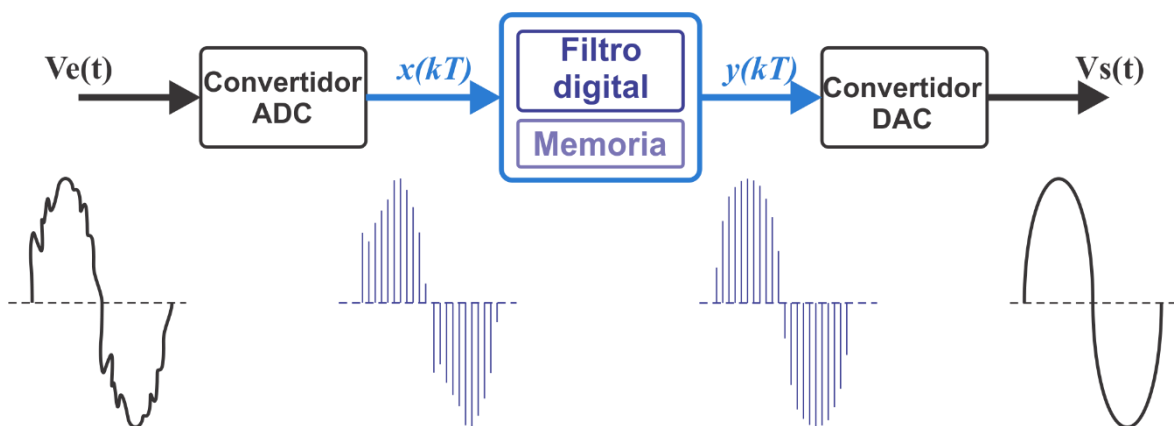


Figura 8.3. Diagrama de bloques de un sistema de filtro digital.

Material

- 1 Microcontrolador PIC16F887
- 1 C.I. DAC0800 Convertidor Digital Analógico.
- 2 C.I. LM741.
- 1 Resistencia de 5.6 KΩ a ½ W.
- 5 Resistencias de 10 KΩ a ½ W.
- 3 Resistencias de 1 KΩ a ½ W.
- 1 Potenciómetro de 50 KΩ.
- 1 Capacitor de 1 nF.

NOTA: El C.I. DAC0800 puede ser sustituido por el MC1408, que tiene el mismo funcionamiento y distribución de terminales.

Equipo

- 1 Fuente bipolar.
- 1 Generador de funciones
- 1 Osciloscopio.

Actividades previas a la realización de la práctica

1. El alumno realizará la lectura de la práctica.
2. Investigue las ecuaciones que representan a los algoritmos de los filtros digitales de retardo, promedio de dos términos y promedio de tres términos.

- Basándose en el código en lenguaje C para el microcontrolador PIC16F887 mostrado en la figura 8.5(a) y 8.5(b), incorpore los algoritmos para que el microcontrolador funcione como un filtro digital pasa bajas.

Procedimiento Experimental

- Una vez armado el circuito de la figura 8.4, calibre los generadores de señales senoidales para obtener la señal $V1 = 2.25 \sin 3141.59t + 2.5V_{CD}$ y la señal $V2 = 0.25 \sin 31415.92t$. Esto también se puede lograr usando el generador de funciones del menú de instrumentos virtuales, pero será necesario utilizar dos, uno para cada señal.
- Pruebe el funcionamiento del circuito comenzando con los selectores en la posición 00 para el filtro de retardo.
- Ajuste el potenciómetro hasta obtener a la salida del circuito una señal V_s aproximadamente de 5Vpp.
- Obtenga la gráfica de las señales de entrada (V_e) y salida (V_s) del sistema, recuerde que el osciloscopio debe estar ajustado en acoplo de CD.

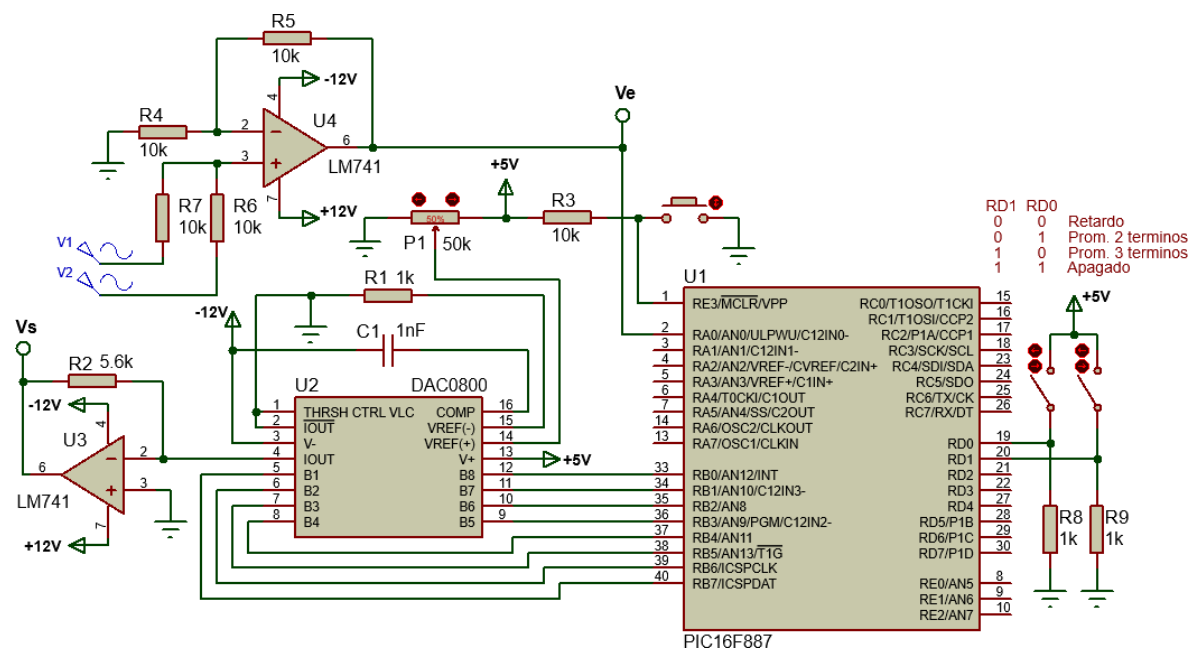


Figura 8.4. Circuito del sistema de filtro digital.

- Con ayuda de los cursores mida la diferencia de fase entre ambas señales.
- Cambien la posición de los interruptores para probar el funcionamiento de cada uno de los filtros programados dentro del microcontrolador. Recuerde proporcionar un pulso en la terminal MCLR para cambiar entre cada tipo de filtro.
- Obtenga las gráficas correspondientes a cada uno de los tipos de filtro y anote sus observaciones sobre el comportamiento de la señal de salida para cada caso.
- Modifique la señal de entrada $V1$ para que tenga una forma triangular mientras que $V2$ se mantiene sin cambios.
- Repita las mediciones realizadas para cada tipo de filtro, obteniendo sus respectivas gráficas y anote sus comentarios.

```

// *** Filtros digitales – Pasa bajas *** //
/*Directivas de pre-procesado*/
#include <16F887.h> //Definición del PIC.
#define device adc=8 //Especificar el convertidor.
#define fuses INTRC_IO,FCMEN,IESO //Fuse del oscilador.
#define fuses NOWDT,NOBROWNOUT,PUT,MCLR,NODEBUG,NOLVP //Fuses de reset.
#define fuses NOPROTECT,NOCPD,NOWRT //Fuses de seguridad.

/*Directivas de control*/
#define use delay(clock=8M) //Directiva que define la Frec. CLK.
#define use fast_io(B)
#define use fast_io(C)
#include <lcd.c> //Driver de control del display LCD.

/*Programa principal*/
void main(){
    long conv=0; //Variable de 16 bits para la conversión.
    long salida=0; //Variable de salida del filtro (y).
    long muestra=0; //Muestra almacenada del tiempo -T.
    long muestra2=0; //Muestra almacenada del tiempo -2T.

    set_tris_B(0); //Configuración de puertos.
    set_tris_D(255);
    output_B(0);
    output_D(0);

    /*Configuración del módulo convertidor*/
    setup_adc_ports(sAN0); //Configura el canal analógico 0
    setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL); //Reloj de conversión interno

    /****** FILTRO CON RETARDO *****/
    if(input(PIN_D0)==0 && input(PIN_D1)==0)
    {
        Área donde se especifica el algoritmo del filtro con retardo.
    }
}

```

Figura 8.5(b). Código para el microcontrolador.

```

/***** FILTRO PROMEDIO DE DOS TERMINOS *****/
if(input(PIN_D0)==1 && input(PIN_D1)==0)
{

    Área donde se especifica el algoritmo del promedio de dos términos.

}

/***** FILTRO PROMEDIO DE TRES TERMINOS *****/
if(input(PIN_D0)==0 && input(PIN_D1)==1)
{

    Área donde se especifica el algoritmo del promedio de tres términos.

}

/***** SISTEMA APAGADO *****/
if(input(PIN_D0)==1 && input(PIN_D1)==1)
{

    Área donde se especifica el algoritmo que mantiene en espera al µC.

}
}

```

Figura 8.5(b). Código para el microcontrolador.

Cuestionario

4. Determine el orden de cada uno de los filtros digitales revisados durante la práctica.
5. Para las expresiones de los tres filtros determine los coeficientes de cada uno.
6. ¿Cuál es la diferencia entre un filtro digital recursivo y un filtro digital no recursivo? ¿A qué categoría corresponden los filtros de la práctica?