

CAPÍTULO 3. ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES.

3.1. INTRODUCCIÓN.

La señal de salida de un sistema de medición en general se debe procesar de una forma adecuada para la siguiente etapa de la operación. La señal puede ser por ejemplo, demasiado pequeña, y sería necesario amplificarla; podría contener interferencias que eliminar; ser no lineal y requerir su linealización; ser análoga y requerir su digitalización; ser digital y convertirla en análoga; ser un cambio de voltaje y convertirla a un cambio en corriente de magnitud adecuada, etc. A todas estas modificaciones se les designa por lo general con el término “Acondicionamiento de Señales”.

Los sistemas de instrumentación se pueden clasificar en dos clases principales: analógicos y digitales. Los sistemas analógicos tratan en forma analógica la información de mediciones, se pueden definir como una función continua. Los sistemas digitales manejan la información en forma digital. Una cantidad digital puede consistir en un número de pulsos discretos y discontinuos cuya relación de tiempo contiene información referente a la magnitud o naturaleza de la cantidad.

Procesos del acondicionamiento de señales

Los siguientes son algunos de los procesos que se pueden presentar en el acondicionamiento de una señal:

- a) *Protección* para evitar el daño al siguiente elemento.
- b) *Convertir una señal en un tipo de señal adecuado.* Sería el caso de cuando es necesario convertir una señal a un voltaje de cd, a una corriente o presión.
- c) *Obtención del nivel adecuado de la señal.* En muchos caso es necesario amplificar una señal para que esta pueda ser leída.
- d) Eliminación o reducción de ruido. La forma más común es utilizar filtros.
- e) Manipulación de la señal. Por ejemplo, convertir una variable en una función lineal.

3.2 EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL.

El fundamento de numerosos módulos para el acondicionamiento de señales es el amplificador operacional. Este es un amplificador de alta ganancia de cd, en general de 100.000 o más, y esta disponible como circuito integrado en *chips* de silicio. Tiene dos entradas: una inversora (-) y otra no inversora (+). La salida depende de cómo se hagan las conexiones de estas entradas.

3.2.1 Amplificador inversor.

La configuración del circuito se muestra en la figura 3.1.

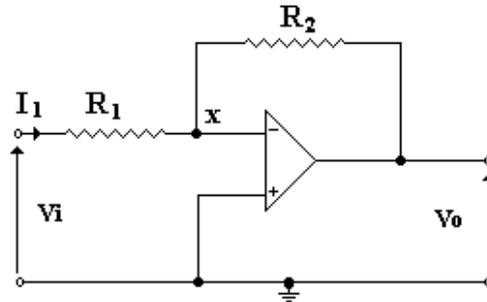


Figura 3.1. Amplificador inversor.

La ganancia en voltaje del circuito es la siguiente: $\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1}$

3.2.2. Amplificador no inversor.

La configuración del circuito se muestra en la figura 3.2.

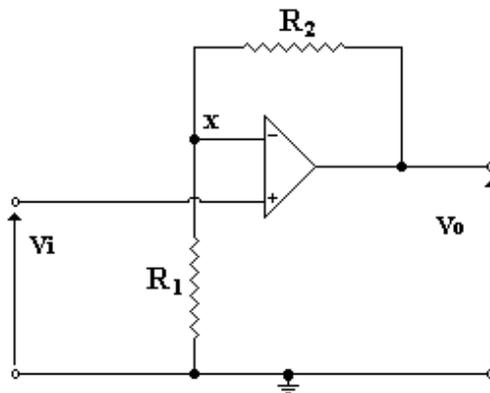


Figura 3.2. Amplificador no inversor.

La ganancia en voltaje del circuito es la siguiente: $\frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$

3.2.3. Amplificador sumador.

La configuración del circuito se muestra en la figura 3.3.

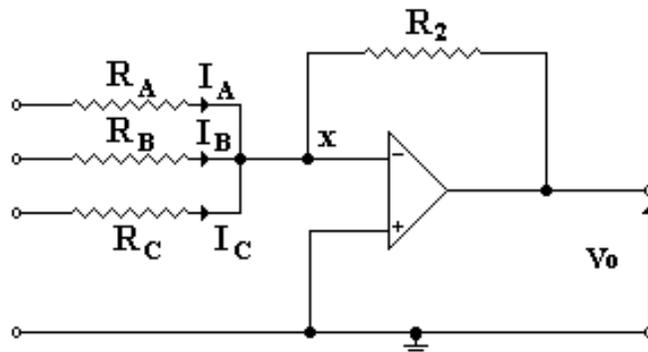


Figura 3.3. Amplificador sumador.

La ganancia en voltaje del circuito es la siguiente: $-\frac{V_o}{V_i} = \frac{V_A}{R_A} + \frac{V_B}{R_B} + \frac{V_C}{R_C} + \dots \frac{V_N}{R_N}$

Si $R_A = R_B = R_C = \dots R_N = R_1$ entonces: $V_o = -\frac{R_1}{R_2}(V_A + V_B + V_C + \dots V_N)$

3.2.4. Amplificador integrador.

La configuración del circuito se muestra en la figura 3.4.

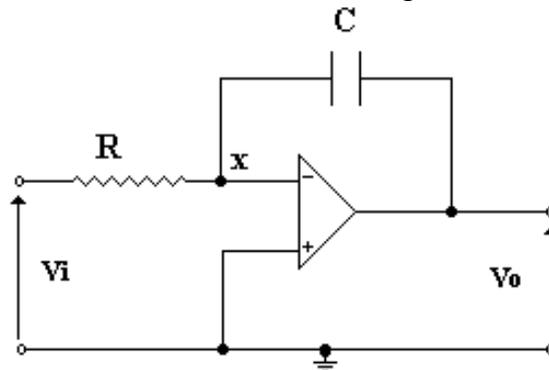


Figura 3.4. Amplificador integrador.

La ganancia en voltaje del circuito es la siguiente: $\frac{V_i}{R} = -C \frac{dv_o}{dt}$

3.2.5. Amplificador diferencial.

La configuración del circuito se muestra en la figura 3.5.

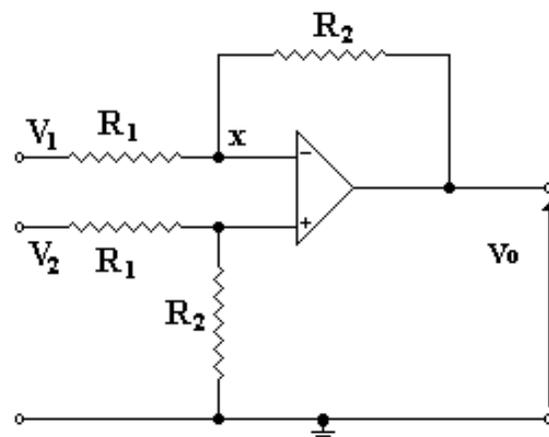


Figura 3.5. Amplificador diferencial.

La ganancia en voltaje del circuito es la siguiente: $V_o = \frac{R_2}{R_1}(V_2 - V_1)$

3.2.6. Amplificador logarítmico.

La configuración del circuito se muestra en la figura 3.6.

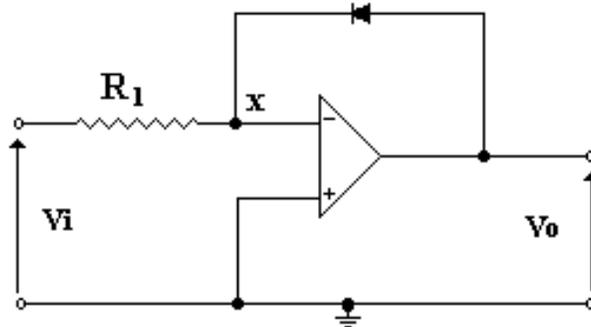


Figura 3.6. Amplificador logarítmico.

La ganancia en voltaje del circuito es la siguiente: $V_o = -C \ln\left(\frac{V_i}{R}\right) = K \ln V_i$, donde K es una constante.

3.2.7. Comparador.

Un comparador indica cuál de dos voltajes es mayor, y con este fin se puede utilizar un amplificador sin retroalimentación u otras componentes. Uno de los voltajes se aplica a la entrada inversora y el otro a la no inversora. Cuando dos entradas son iguales, no hay salida.

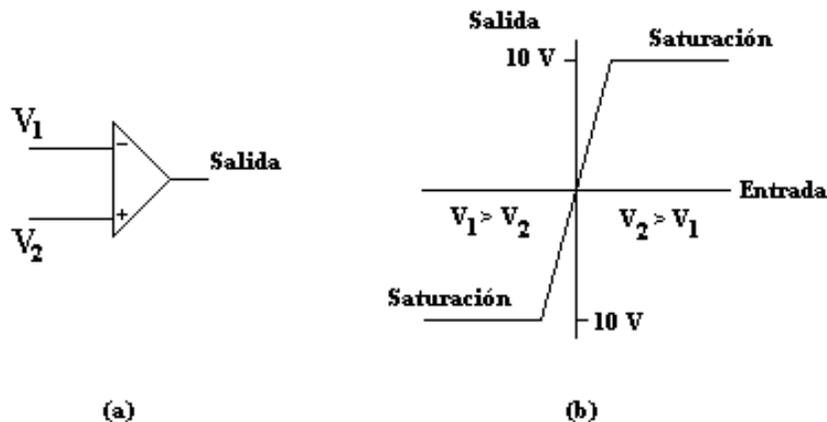


Figura 3.7. Comparador.

3.3. AMPLIFICADOR USADO EN INSTRUMENTACIÓN.

Los voltajes y corrientes de salida de muchos transductores son señales muy pequeñas. Además de los bajos niveles, a menudo es necesario transmitir la salida del transductor hacia el equipo de adquisición de datos o de control. En el arreglo de problemas, sobre todo en un ambiente industrial donde hay mucha maquinaria eléctrica, el ruido eléctrico puede causar serias dificultades en circuitos de bajo nivel. Estos ruidos pueden ser radiados, como un campo electromagnético, o inducidos en el cableado de la

planta, como circuitos a tierra, y picos producidos por la fuente de alimentación de ca. A pesar de las fuentes de ruido, las señales de bajo nivel se deben transmitir con cuidado de un lugar a otro.

Un método efectivo para combatir el ruido es incrementar la intensidad de las señales de bajo nivel antes de su transmisión a través de los alambres. Esto se realiza frecuentemente con un amplificador llamado “*amplificador de instrumentación*”.

Varias características de un amplificador de instrumentación lo distinguen de los amplificadores operacionales.

- Los amplificadores de instrumentación tienen ganancia finita. Un amplificador operacional tiene una ganancia muy grande, la cual es infinita en el caso ideal. El amplificador operacional se suele utilizar con realimentación externa para proporcionar una ganancia finita, o con otros elementos de circuito con el fin de generar otras funciones, como integradores, diferenciadores, filtros, etc. Además de una ganancia finita el amplificador de instrumentación no proporciona estas funciones.
- El amplificador de instrumentación tiene una entrada diferencial de alta impedancia. El amplificador operacional también la tiene, sin embargo, cuando los elementos de realimentación se adicionan alrededor del amplificador operacional, la impedancia de entrada disminuye considerablemente.
- El amplificador de instrumentación tiene un rango de voltaje alto y un rechazo en modo común también alto. Aunque los amplificadores operacionales tienen rechazo y rango de voltaje en modo común, el amplificador de instrumentación es superior a la mayoría de los amplificadores operacionales.

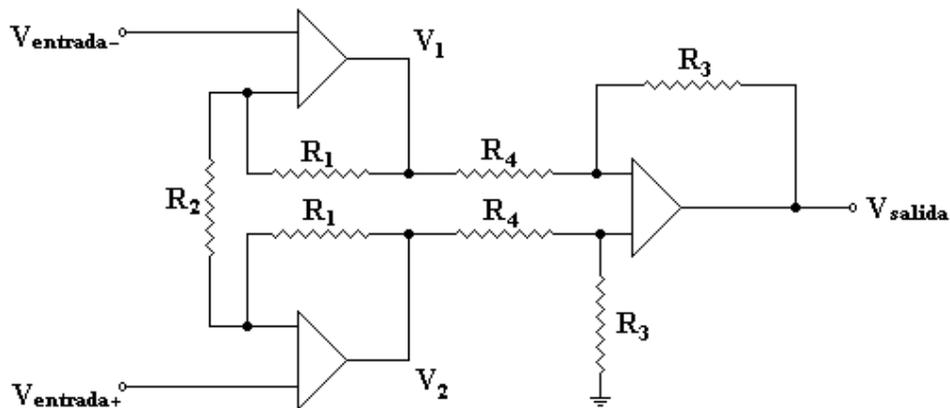


Figura 3.8. Amplificador usado en instrumentación.

Si $R_2 = R_3$ tenemos:
$$V_{o2} - V_{o1} = \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right) (V_{i1} - V_{i2})$$

3.4. PROTECCIÓN.

Existen diversas situaciones en las que la conexión de un sensor con la unidad siguiente, por ejemplo un microprocesador, implica la posibilidad de causar daños como

resultado quizás de un voltaje o corriente elevados. Para protegerse de corrientes grandes en la línea de entrada se incorpora una serie de resistencias que limiten la corriente a un nivel aceptable y un fusible que se funda cuando la corriente excede un nivel seguro. Contra altos voltajes y polaridades equivocadas se utiliza un diodo Zener (ver figura 3.9).

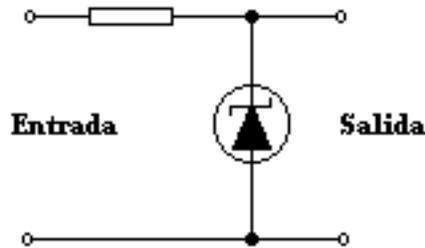


Figura 3.9. Diodo Zener.

Los diodos Zener se comportan como un diodo común hasta que se presenta un voltaje de ruptura, a partir del cual se convierten en conductores. Dado que éstos tienen una baja resistencia a la corriente en una dirección y una resistencia elevada en dirección contraria, también sirve como protección contra polaridades invertidas.

En algunas situaciones es deseable aislar del todo los circuitos y eliminar todas las conexiones eléctricas entre ellos. Para ello se utiliza un *optoaislador*; implica convertir una señal eléctrica en una señal óptica; esta pasa a un detector que a su vez, la vuelve a convertir en una señal eléctrica (ver figura 3.10).

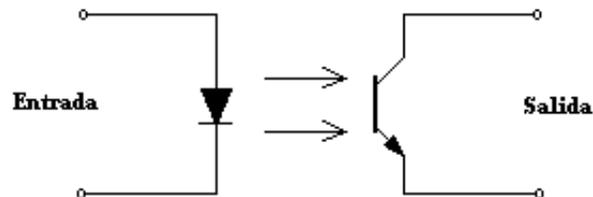


Figura 3.10. Optoaislador.

3.5. FILTRADO.

El término filtrado se refiere al proceso de eliminación de cierta banda de frecuencias de una señal y permite que otras se transmitan. El rango de frecuencias que pasa un filtro se conoce como *banda de paso*, y el que no pasa *banda de supresión*; la frontera entre lo que se suprime y lo que pasa se conoce como *frecuencia de corte*. Los filtros se clasifican de acuerdo a los rangos de frecuencia que transmiten o rechazan.

Un *filtro pasa bajas* (figura 3.11.a) tiene una banda de paso que acepta la transmisión de todas las frecuencias desde cero hasta cierto valor. El *filtro pasa altas* (figura 3.11b) tiene una banda de paso que acepta la transmisión de todas las frecuencias a partir de un determinado valor hasta el infinito. El *filtro pasa bandas* (figura 3.11c) permite la transmisión de todas las frecuencias que están dentro de una banda especificada. El *filtro supresor de banda* (figura 3.11d) rechaza e impide la transmisión de todas las frecuencias

de cierta banda. En todos los casos, la frecuencia de corte se define como aquella para la cual el voltaje de salida es 70.7% del de la pasa banda.

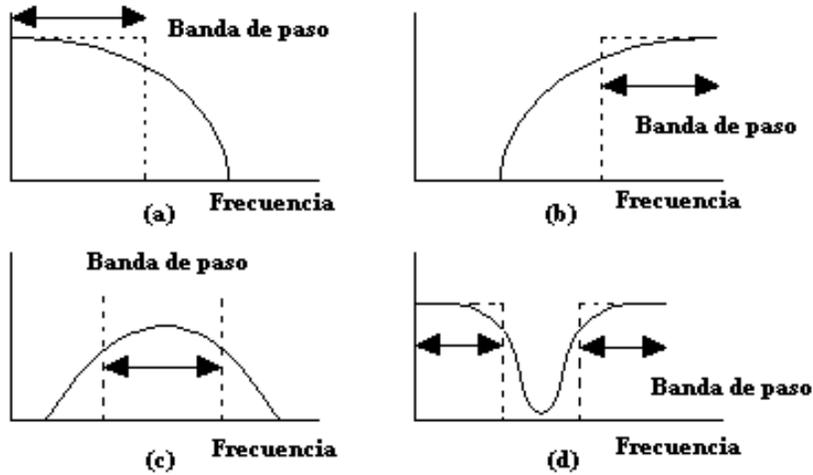


Figura 3.11. Características de los filtros ideales. a) Pasa bajas, b) Pasa altas, c) Pasa bandas, d) Supresor de banda.

3.6. CONVERSIÓN DE SEÑALES ANÁLOGAS.

Esta etapa tiene por objetivo convertir una señal en un tipo de señal adecuado. Sería por ejemplo el caso de cuando es necesario convertir una señal a un voltaje de cd, a una corriente o presión. A continuación se describen las principales técnicas utilizadas para la conversión de señales análogas.

3.6.1. El puente de Wheastone.

El puente de Wheastone se utiliza para convertir un cambio de resistencia a uno de voltaje. En la figura 3.12 se muestra la configuración básica de este puente.

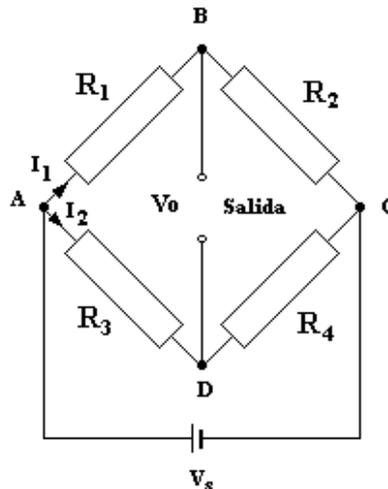


Figura 3.12. Puente de Wheastone.

Se dice que el puente está balanceado cuando: $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$

Si una de las resistencias cambia su condición de balance el voltaje de alimentación V_0 se conecta entre los puntos A y C, y por esto la caída de potencial en la resistencia R_1 es la fracción $\frac{R_1}{R_1 + R_2}$. Por lo tanto: $V_{AB} = \frac{V_S R_1}{R_1 + R_2}$

De igual manera, la diferencia de potencial en R_3 es:

$$V_{AD} = \frac{V_S R_3}{R_3 + R_4}$$

De esta manera, la diferencia de potencial entre B y D, es decir, la diferencia de potencial a la salida V_0 es:

$$V_o = V_{AB} - V_{AD} = V_s \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right)$$

Esta ecuación expresa la condición de balance cuando $V_0=0$.

3.6.2. Convertidor de voltaje a corriente.

Un método para reducir errores debidos a la intervención de resistencias y a los efectos de las corrientes de la fuente de alimentación, es utilizar corriente en vez de voltaje para la transmisión. Un sistema de transmisión típico de corriente usa corriente desde 4 a 20 mA para la transmisión a escala máxima de un parámetro específico. La corriente de bajo nivel de 4 mA incluye la corriente de la fuente de alimentación, la cual permite componentes de la señal de corriente de 16mA.

La figura 3.13. presenta un convertidor de voltaje a corriente para un circuito de 4 a 20 mA. Se utilizan dos fuentes de corriente controladas por voltaje para el convertidor. Una fuente de corriente detecta la corriente de la fuente de alimentación para el amplificador, más la energía de la fuente de corriente controlada por voltaje, I_2 , y establece la suma igual a 4 mA. La segunda fuente controlada por voltaje, I_1 , proporciona una corriente variable como función del voltaje del transductor, conforme lo entrega el amplificador de instrumentación. Esta fuente de corriente proporciona desde 0 a 16 mA para una corriente total de 4 a 20 mA.

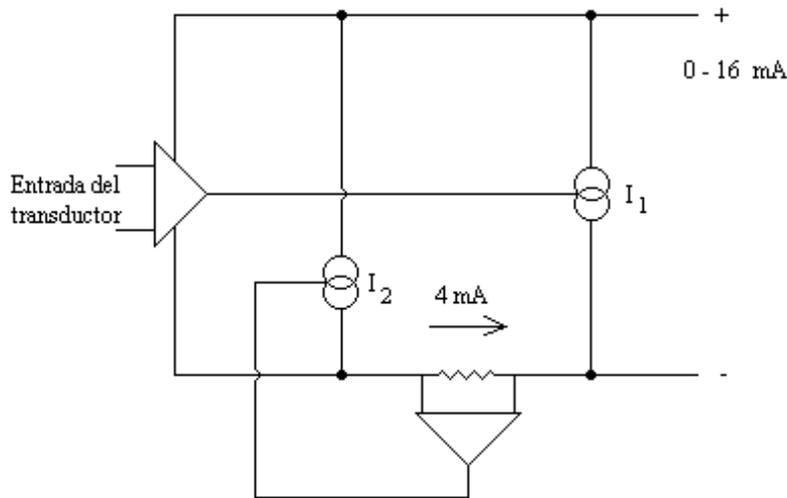


Figura 3.13. Transmisor de corriente de lazo.

3.6.3. Convertidor de voltaje a frecuencia.

En algunos ambientes de ruido es muy difícil la transmisión de señales análogas, para estas situaciones, la señal analógica se convierte en digital para la transmisión. Un método sencillo es convertir la entrada analógica en una frecuencia, utilizando un convertidor de voltaje en frecuencia y luego, ya en el receptor, convertir la frecuencia a un voltaje mediante un dispositivo semejante.

La figura 3.14 muestra un convertidor de voltaje a frecuencia. Este convertidor consta de un integrador que alimenta a un comparador, el cual excita a un multivibrador monoestable. Un interruptor electrónico descarga el integrador vía una fuente de corriente. Las formas de onda relacionadas con el convertidor de voltaje en frecuencia se ilustran en la figura 3.14. El voltaje de entrada, $V_{entrada}$, hace que la salida del integrador sea una rampa en dirección negativa. Si la salida de un integrador se inicia a partir de algún voltaje positivo, la salida llegará a un voltaje de cero y el multivibrador monoestable producirá un impulso de salida. Con este voltaje de cero volts del integrador como el punto de inicio para la investigación del convertidor de voltaje a frecuencia, la salida del integrador será una rampa en sentido positivo para un tiempo igual a t_2 . Este tiempo se establece por la duración del pulso multivibrador monoestable y causa que la salida del integrador alcance un nivel de salida igual a V_{ref} .

La frecuencia de salida del convertidor es independiente del valor del capacitor de integración e igual a:

$$f = \frac{V_{entrada}}{I \cdot R \cdot t_2}$$

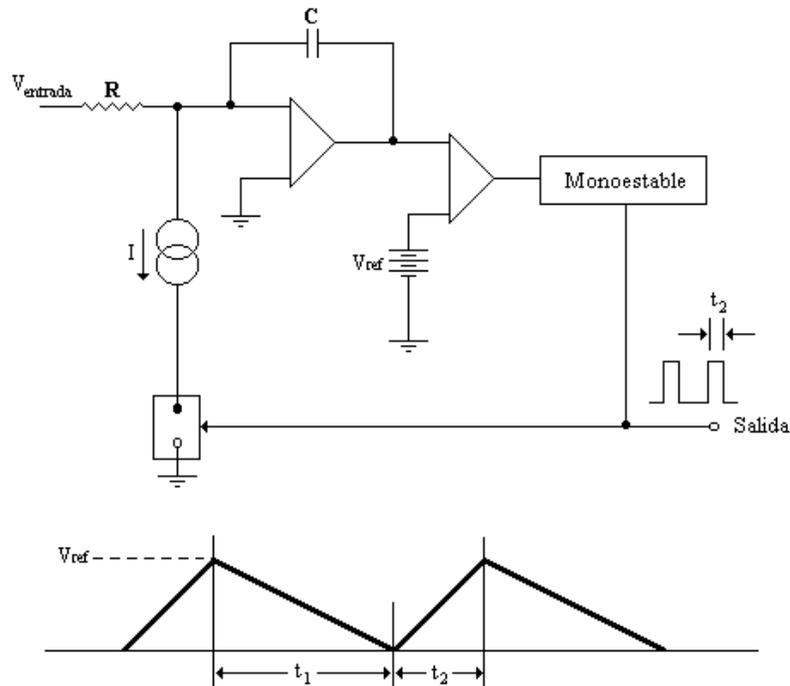


Figura 3.14. Convertidor de voltaje a frecuencia.

3.6.4. Convertidor de frecuencia a voltaje.

Para elaborar el sistema se utilizan los mismos elementos que configuran el convertidor de voltaje en frecuencia para crear una salida analógica a partir de una entrada de frecuencia variable.

La frecuencia de entrada se utiliza para disparar el monoestable (figura 3.15). el ciclo de trabajo de salida del monoestable es $\frac{t_1}{t_2} = ft_1$, donde

- t_1 = duración del pulso del monoestable
- t_2 = periodo de la frecuencia de entrada
- f = frecuencia de entrada

El voltaje promedio de la forma de onda del pulso, como salida del monoestable, es el voltaje pico multiplicado por el ciclo de trabajo, es decir:

$$V_{promedio} = V_p ft_1$$

Esta ecuación indica que el valor promedio de la salida del monoestable es proporcional a la frecuencia de entrada. Para convertir la forma de onda del pulso de salida del monoestable en un nivel de cd, es necesario integrar la salida del monoestable (figura 3.15).

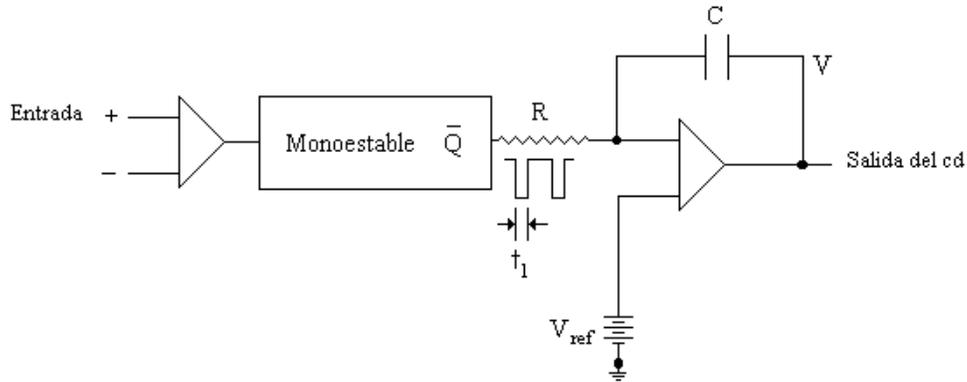


Figura 3.15. Convertidor de frecuencia a voltaje.

3.6.5. Técnica de modulación por pulsos.

Un problema frecuente en la transmisión de señales de cd de bajo nivel generadas por sensores es que la ganancia del amplificador operacional usado para amplificar estas señales puede experimentar un desplazamiento o deriva, al igual que la salida. Este problema se puede corregir con una señal que sea una secuencia de impulsos en vez de una señal continua en el tiempo.

Una manera de realizar lo anterior es dividiendo la señal de cd como se indica en la figura 3.16; la salida del divisor es una cadena de impulsos cuyas alturas tienen relación con el nivel de cd de la señal de entrada. A este procedimiento se le denomina *modulación por amplitud de impulsos*.

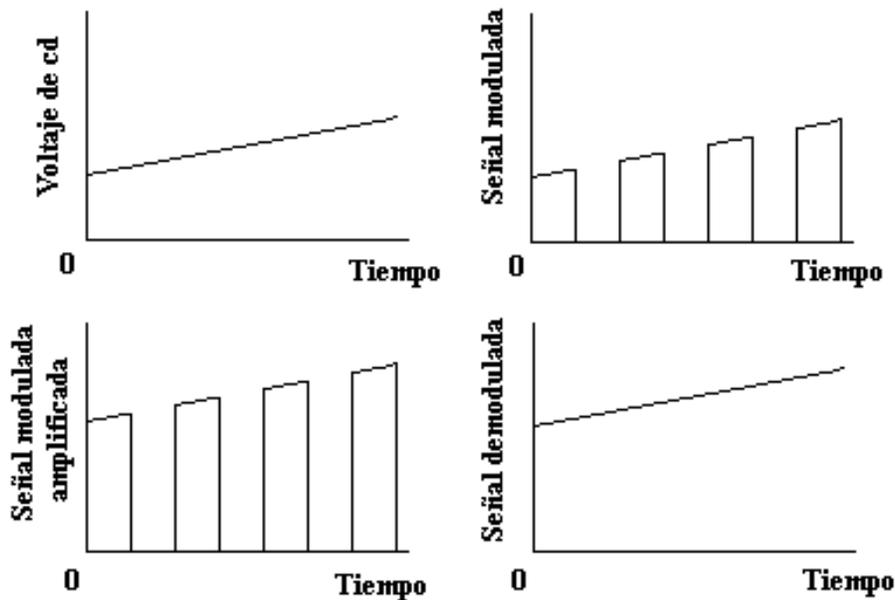


Figura 3.16. Modulación por amplitud de pulsos.

Una alternativa a lo anterior es *la modulación por ancho del pulso (PWM)*, donde el ancho, es decir, la duración del pulso y no su amplitud es lo que depende la magnitud del voltaje (figura 3.17).

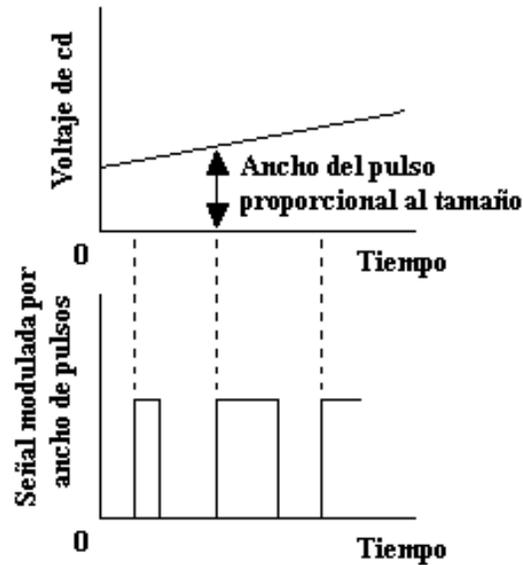


Figura 3.17. Modulación por ancho de pulso.

La modulación por ancho del pulso con frecuencia se utiliza en los sistemas de control para controlar el valor promedio de un voltaje de cd. En este caso, un voltaje analógico constante se divide en pulsos variando el ancho de éstos, de manera que el valor promedio del voltaje pueda modificarse. En la figura 3.18 se ilustra lo anterior. El término ciclo de trabajo se refiere a la fracción de cada ciclo en el cual el voltaje es alto.

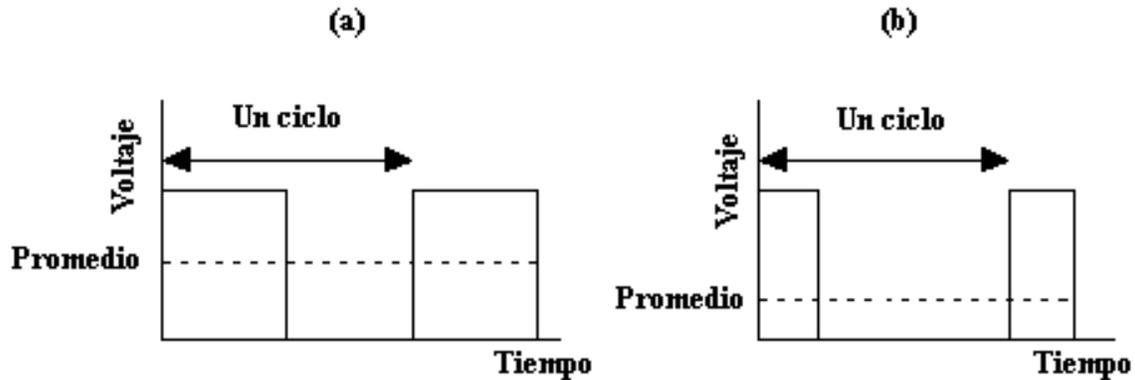


Figura 3.18. Modulación por ancho de pulso para control de voltaje: a) ciclo de trabajo del 50%, b) ciclo de trabajo del 25%.

3.7. MANIPULACIÓN DE LAS SEÑALES.

3.7.1. Conversión de señales analógicas a digitales.

La *conversión de señales analógicas a digitales* implica la conversión de las primeras a palabras binarias. En la figura 3.19 se muestran los elementos básicos de la conversión análogo-digital.

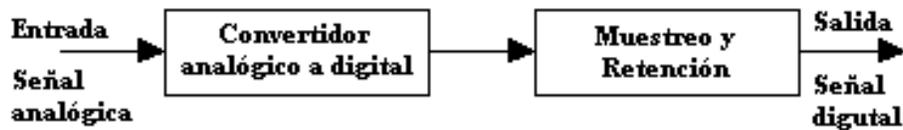


Figura 3.19. Conversión análogo-digital.

El procedimiento utilizado es un temporizador que proporciona al convertidor analógico a digital (CAD) pulsos de señal de duración regular y cada vez que este recibe un impulso, realiza un muestreo de la señal analógica. La figura 3.20 muestra la conversión analógica a digital y los diversos tipos de señal de las distintas etapas. La unidad de muestreo y retención es necesaria porque el convertidor analógico a digital requiere de una cantidad finita de tiempo, conocido como *tiempo de conversión*, para convertir la señal analógica en una señal digital.

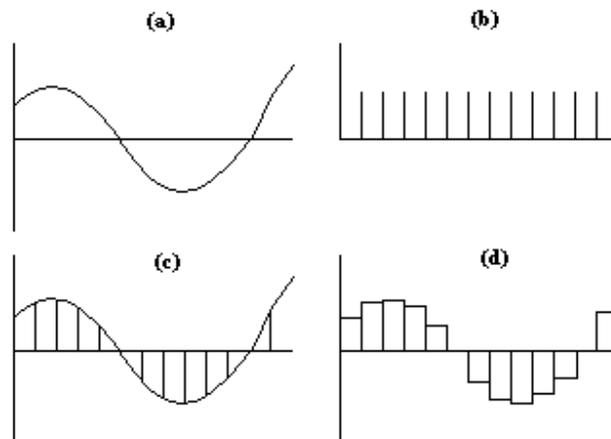
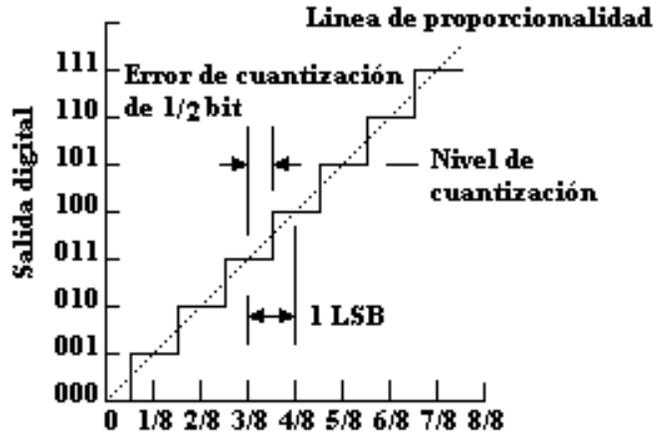


Figura 3.20. Señales: a) analógica, B) del reloj c) muestreada y d) muestreada y retenida.

La relación entre la entrada muestreada y retenida y la salida de un CAD se ilustra en la figura 3.21 para una salida digital de 3 bits. Cuando hay tres bits, existen $2^3=8$ posibles niveles de salida. Por lo tanto, dado que la salida del CAD para representar la entrada analógica sólo puede ser uno de estos ocho niveles, existe un rango de entradas en las cuales la salida no cambia. Estos posibles niveles de salida se conocen como *niveles de cuantización* y la diferencia en el voltaje analógico entre dos niveles adyacentes se denomina *intervalo de cuantización*. La salida digital no siempre es proporcional a la entrada analógica, por lo que habrá un error el que se denomina *error de cuantización*.



Voltaje de entrada analógico expresado como una fracción de la entrada a escala total

Figura 3.21. Entada-salida de un CAD.

Teorema del muestreo

¿Con qué frecuencia debe muestrearse una señal analógica para que produzca una salida representativa de la señal analógica?

En la figura 3.22 se ilustra el problema utilizando diversas velocidades de muestreo para una misma señal analógica. La respuesta se encuentra en el teorema de *Nyquist o teorema del muestreo de Shannon* que dice: "cuando la frecuencia de muestreo es inferior al doble de la frecuencia mayor, la reconstrucción podría representar otra señal analógica y se obtendría una imagen falsa de la señal real, lo cual se conoce como falsa duplicación."

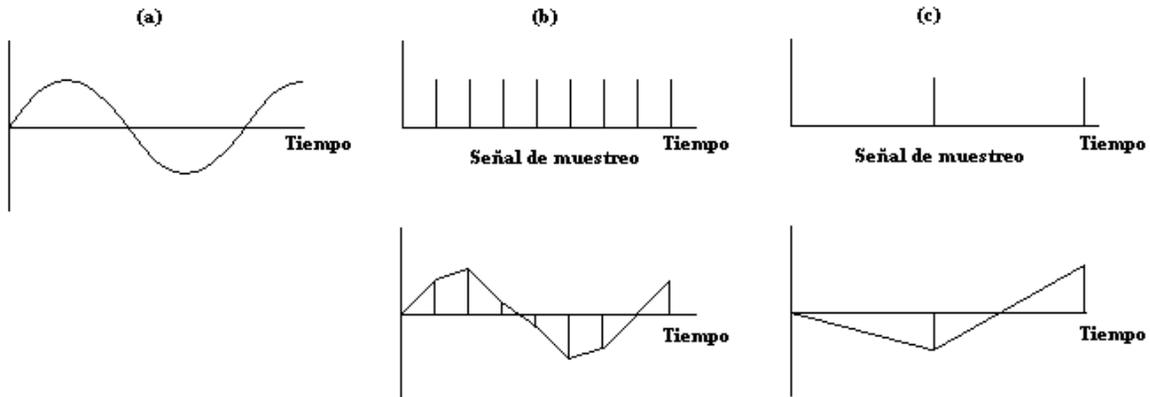


Figura 3.22. Efecto de la frecuencia de muestreo: a)señal analógica, b) señal muestreada, c)señal muestreada.

Cuando el muestreo de una señal se realiza con mucha lentitud, puede darse una falsa interpretación de los componentes de alta frecuencia, interpretados en forma errónea como dobles de frecuencias más bajas.

3.7.2. Conversión de señal digital a analógica.

La entrada de un conversor digital a analógico (CDA) es una palabra binaria; la salida es una señal analógica que representa la suma ponderada de los bits que no son cero representados en la palabra. Por ejemplo, una entrada de 0010 produce una salida analógica que es el doble de lo que se obtiene con una entrada de 0001. La figura 3.23 ilustra lo anterior para la entrada de un CDA con resolución de 1 V para palabras binarias. cada bit adicional aumenta el voltaje de salida en 1 V.

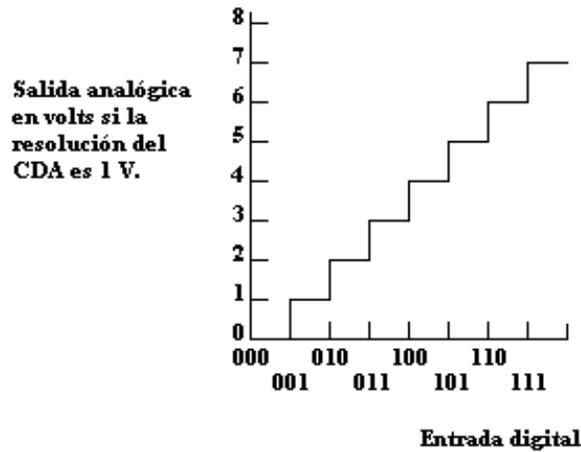


Figura 3.23. Entrada-salida de un CDA.

3.7.3. Multiplexores.

Un multiplexor es un circuito que puede recibir datos provenientes de diversas fuentes para después al seleccionar un anal de entrada, producir una salida correspondiente a sólo uno de ellos (ver figura 3.24). El multiplexor es, en esencia, un dispositivo de conmutación electrónica con el que las entradas se muestrean por turno.

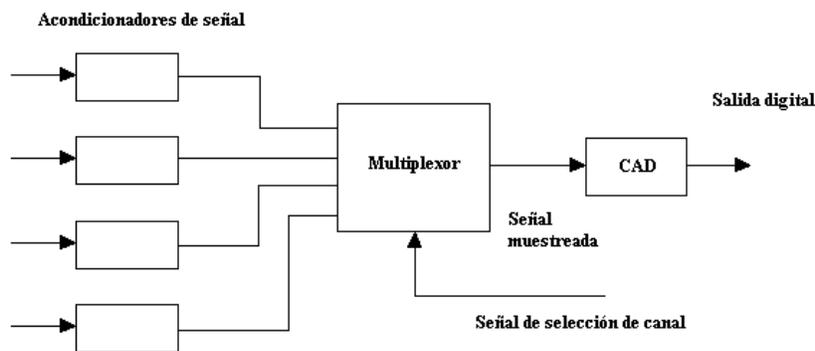


Figura 3.24. Multiplexor.

3.7.3.1. Multiplexor digital.

En la figura 3.25 se muestra el funcionamiento básico de un multiplexor que se usa para seleccionar entradas de datos digitales. Para simplificar, se muestra un sistema de sólo dos canales de entrada.

El nivel lógico aplicado a la entrada de selección determinará cuál de las compuertas AND se activa para que la entrada de sus datos pase por la compuerta OR y salga.

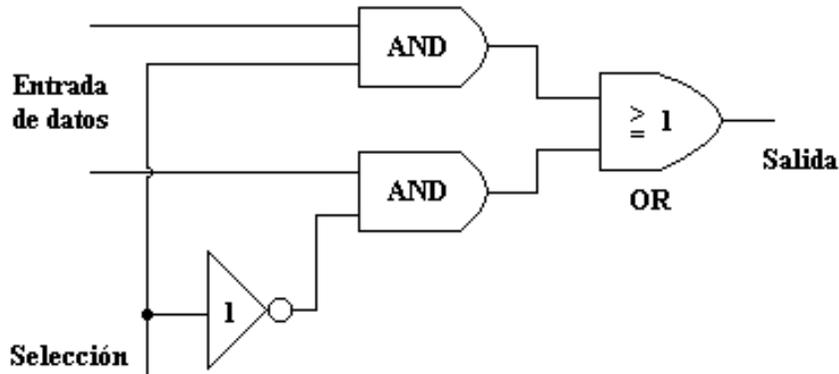


Figura 3.25. Multiplexor de dos canales.

3.7.3.2. Multiplexión por división de tiempo.

Se utiliza cuando se necesita que diversos dispositivos periféricos compartan las mismas líneas de entrada/salida de un microprocesador. Por lo tanto, a cada dispositivo se le proporcionan los datos característicos para asignar a cada uno una ranura de tiempo particular durante el cual se transmiten datos. En la figura 3.26 se ilustra cómo se utiliza para controlar dos dispositivos de indicación. En la figura 3.26(a) el sistema no está multiplexado en el tiempo, pero en 3.26(b) sí.

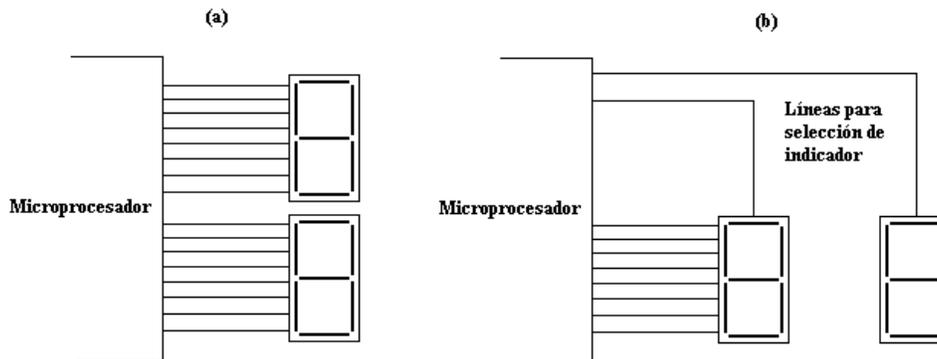


Figura 3.26. Multiplexión por división de tiempo.

3.8. ADQUISICIÓN DE DATOS.

El término adquisición de datos describe el proceso que consiste en tomar datos de los sensores e introducirlos en una computadora para procesarlos. Los sensores están conectados, por lo general después de someterlos a un acondicionamiento de señal, a una tablilla de adquisición de datos conectada en la parte posterior de una computadora (figura 3.27(a)). Se trata de una tablilla de circuito impreso que, para entradas análogas, cuenta con circuitos para realizar funciones de multiplexión, amplificación, conversión analógica a digital, registro y control, a fin de alimentar las señales digitales muestreadas en el sistema de computación. En la figura 3.27(b) se muestran los elementos básicos de estas tablillas.

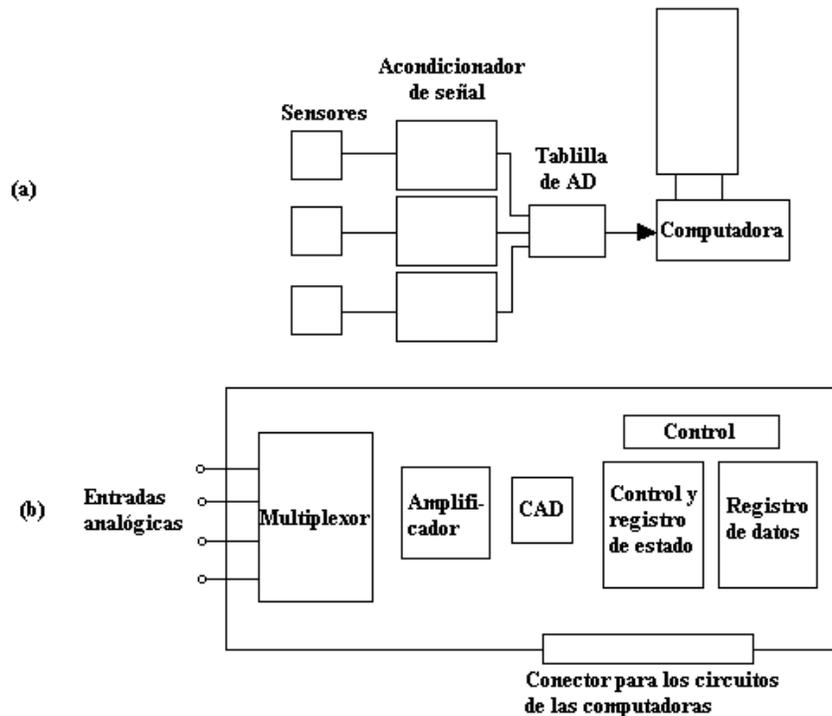


Figura 3.27. Sistema de adquisición de datos.

Sistema de adquisición de datos analógico y digital.

Un *sistema de adquisición de datos analógico* consta de algunos o todos los elementos siguientes:

- Transductores* para la transformación de parámetros físicos en señales eléctricas.
- Acondicionadores de señales* para la amplificación, modificación o selección de ciertas partes de estas señales.
- Dispositivos de presentación visual* para monitoreo continuo de las señales de entrada.
- Instrumentos de registro de gráficas* para obtener un registro permanente de los datos de entrada.
- Instrumentación de cinta magnética para guardar los datos de entrada, conservar su forma eléctrica original y reproducirlos posteriormente para un análisis más detallado.

Un *sistema de adquisición de datos digital* puede incluir alguno o todos los elementos siguientes que se muestran en la figura 3.28. Las operaciones esenciales dentro de un sistema digital incluyen: manipulación de señales analógicas, medición, conversión y manejo de datos digitales, y programación y control interno. La función de cada elemento del sistema de la figura 3.28 se describe a continuación.

- a) *Transductor*. Transforma parámetros físicos en señales eléctricas aceptables para el sistema de adquisición. Algunos parámetros son temperatura, presión, nivel, etc.; también es factible medir directamente cantidades eléctricas, como voltaje, resistencia o frecuencia.
- b) *Acondicionador de señal*. Por lo general incluye la circuitería de soporte para el transductor. Esta circuitería puede proporcionar la energía de excitación, circuito de equilibrio y elementos de calibración. Un ejemplo de acondicionador de señal es un puente balanceado con galga extensométrica y unidad de fuente de energía.
- c) *Explotador o multiplexor*. Acepta múltiples entradas de señales análogas y las conecta secuencialmente a un instrumento de medición.
- d) *Convertidor de señal*. Transforma la señal analógica en una forma aceptable para el convertidor análogo-digital.
- e) *Convertidor análogo-digital (A/D)*. Convierte la señal analógica a su forma digital equivalente. La salida del conversor A/D se puede desplegar visualmente y estar disponible para un procesamiento posterior o para grabación en un registrador digital.
- f) *Equipo auxiliar*. Esta sección contiene instrumentos para funciones de programación de sistemas y procesamiento digital de datos. Las funciones auxiliares incluyen linealización y comparación de límites. Estas funciones se pueden ejecutar mediante instrumentos individuales o mediante una computadora digital.
- g) *Registrador digital*. Registra la información digital en sistemas de almacenamiento de datos.

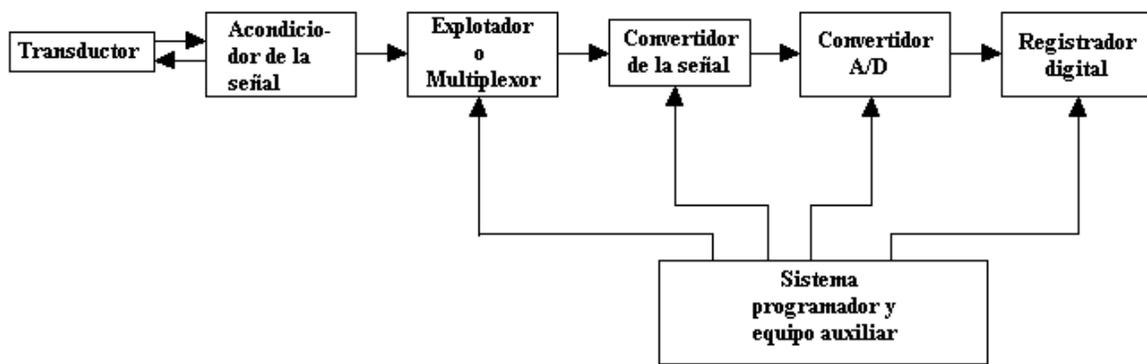


Figura 3.28. Elementos de un sistema de adquisición de datos digital.

3.9. BIBLIOGRAFÍA.

- [1].Creus Solé Antonio; “Instrumentación Industrial”, 6ª edición; Marcombo S.A.; 1997.
- [2].Creus Solé Antonio; “Instrumentos Industriales. Su ajuste y calibración”; 2ª edición; Marcombo S.A.
- [3].Bolton, W. “MECATRONICA: sistemas de Control Electrónico en Ingeniería Mecánica y Eléctrica”. Segunda edición. Editorial Alfaomega, 2001, México.
- [4].Cooper William D., Helfrick Albert D.; “Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición”; 1ª edición en español; Prentice Hall Hispanoamericana S.A.; 1991.