

## **UNIDAD 9: MEDICIÓN DE MAGNITUDES NO ELÉCTRICAS. ACONDICIONAMIENTO Y TRATAMIENTO DE LAS SEÑALES.**

- *Medición de magnitudes no eléctricas.*
- *Amplificadores de instrumentación.*
- *Transductores utilizados.*
- *Introducción a los sistemas de instrumentación.*
- *Sistemas Analógicos - Sistemas Analógicos/ Digitales - Sistemas Digitales.*
- *Interconexión de instrumentos - Bus IEEE 488 - Otras normas y estándares.*
- *Preguntas y problemas.*

**Al concluir el estudio de esta unidad, Ud. será capaz de hacer lo siguiente:**

- Podrá optar entre las distintas técnicas para implementar un sistema de instrumentación de acuerdo con las exigencias de cada caso.
- Una vez que haya tomado la decisión respecto de la técnica a usar podrá, con la ayuda y posterior estudio, de los correspondientes manuales, efectuar el trabajo de ingeniería que implica la interconexión de instrumentos para implementar un sistema de instrumentación.

### ***Medición de magnitudes no eléctricas***

La medición de magnitudes no eléctricas por medio de técnicas e instrumentos electrónicos puede ser efectuada mediante la utilización de dispositivos apropiados que conviertan la magnitud a medir en un parámetro eléctrico simple. Estos dispositivos se conocen como transductores, y los hay de varios tipos, siendo muy comunes aquellos en los que cambia su resistencia con la magnitud a medir, aunque también los hay capacitivos, inductivos, etc.

Generalmente, los transductores de tipo resistivo se insertan en uno de los brazos de un puente y se mide así el desequilibrio del mismo producido por la variación de resistencia del dispositivo. La inclusión del transductor en un puente se hace para aumentar la sensibilidad del sistema de medición, ya que la misma depende directamente de la tensión de alimentación del puente.

Como ejemplos de transductores y magnitudes medibles por estos métodos se pueden mencionar: Los potenciómetros, para la medición de desplazamiento (lineal y angular). Los extensómetros, para medir deformaciones mecánicas. Los termistores, para medir temperaturas. Los LDR (para medir intensidades luminosas). Y los transductores capacitivos (los hay para la medición de presión diferencial y de humedad).

El mismo método es usado también para la medición de magnitudes eléctricas en forma indirecta cuando no es posible hacerlo directamente. Por ejemplo; para la medición de potencia en radio frecuencias por el método bolométrico.

El método de medición también permite resolver, en alguna medida, el problema que se deriva de la inducción de ruido o interferencia en los conductores que conectan el dispositivo con el instrumento o sistema de medidas, particularmente cuando se hallan alejados entre si. Esto es así dado que la salida de un puente es de tipo balanceada, y por lo tanto la mayor parte del ruido y la interferencia se superpone en modo común y pueden ser eliminadas mediante el empleo de dispositivos que se diseñan especialmente para este propósito. Estos se denominan "Amplificadores de instrumentación".

### ***Amplificadores de instrumentación***

Los amplificadores que se verán a continuación se conocen también como: Amplificadores diferenciales de CC. Amplificadores de puentes. Amplificadores Transductores. Amplificadores de error. etc.

Estos amplificadores se pueden implementar fácilmente usando uno o varios amplificadores operacionales con realimentación lineal.

Se supone en el presente estudio que los amplificadores operacionales usados son ideales, es decir que tienen impedancia de entrada infinita, impedancia de salida nula, no tienen desviaciones de CC, no producen ningún tipo de ruido, poseen un factor de ganancia constante y sin error y una RRMC infinita.

#### **Amplificadores que usan un solo amplificador operacional**

Este dispositivo permite obtener una tensión de salida que es función de la diferencia de las tensiones de entrada. la presencia de un voltaje de modo común, es una característica de casi todos los transductores que traducen una variación de un parámetro físico en una tensión. El amplificador debe ser capaz de eliminar esta señal del total que maneja. Esto se logra usando las propiedades de elevado rechazo de la entrada diferencial de los amplificadores operacionales.

El circuito de la figura 9-1(a), que se analiza a continuación, tiene la ventaja de su gran sencillez, ya que solo usa un amplificador operacional y cuatro resistores de igual valor.

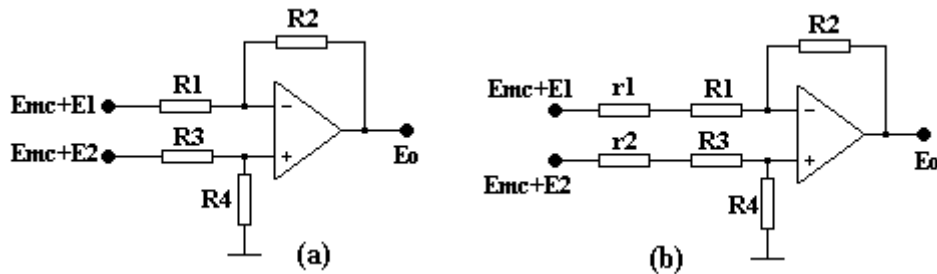


Figura 9-1

Analizando el esquema (a), para calcular la tensión de salida, se halla por separado la salida que se produce debido a cada una de las entradas y luego se suman.

$$E(+) = (E_{mc} + E2) \cdot \frac{R4}{R3 + R4} \cdot \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) \quad ; \quad E(-) = -(E_{mc} + E1) \cdot \left(\frac{R2}{R1}\right)$$

Sumando ambas expresiones.

$$E_o = E(+) + E(-)$$

Y además haciendo.

$$\frac{R4}{R3} = \frac{R2}{R1}$$

Y operando algebraicamente, se puede llegar a la expresión final:

$$E_o = (E_2 - E_1) \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

Como vemos, para valores de  $R_4/R_3$  iguales a  $R_2/R_1$ , las señales de modo común resultan completamente rechazadas a condición de que se cumplan todos los requisitos antes mencionados sobre las características del amplificador operacional utilizado. Como en la práctica los A.O. no tienen rechazo infinito, las características del circuito quedan algo degradadas. Como límite práctico y suponiendo que se utilizan resistores ajustables, la RRMC puede llegar a unos 40 a 50 dB como máximo.

La principal desventaja de esta disposición es que la impedancia de entrada no es infinita (aunque dispusiéramos de un dispositivo ideal), y además, resulta muy complicado variar la ganancia en forma continua.

A medida que se desea una mayor ganancia, la impedancia de entrada resulta ser más baja, comenzando a tener importancia la resistencia interna de las fuentes  $E_1$  y  $E_2$ . La figura 9-1(b) ilustra un circuito donde se tienen en cuenta dichas resistencias ( $r_1$  y  $r_2$ ). En el caso de que las dos resistencias equivalentes sean iguales, se produce solo un error de ganancia, pero si estas son distintas, habrá un empeoramiento de la RRMC. Si se aumentan los valores de  $R_1$  y  $R_3$  y de  $R_2$  y  $R_4$  buscando minimizar el problema, nos encontramos con que ahora comenzarán a tener importancia los errores provocados por las corrientes de polarización (corrientes de off-set) al circular por resistencias de elevado valor. Esto fija el límite superior en cuanto a la ganancia obtenible con este circuito.

En realidad, el funcionamiento óptimo de este circuito se obtiene cuando la ganancia es próxima o igual a la unidad.

El problema de la ganancia ajustable continuamente, se puede solucionar con la modificación introducida al circuito que se muestra en la figura 9-2.

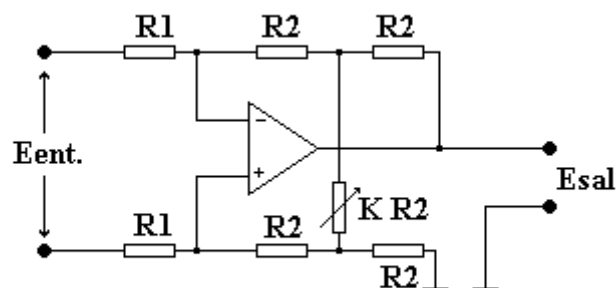


Figura 9-2.

El resistor variable es un potenciómetro con un vernier que permite variar la ganancia del circuito sin afectar su rechazo de modo común. Es de hacer notar sin embargo que ahora se necesitan cuatro resistores de valor igual a  $R_2$  y dos resistores de valor igual a  $R_1$  y que la ganancia es función inversa del valor del potenciómetro y por lo tanto es muy alineal. El

circuito todavía sufre las mismas limitaciones de baja impedancia de entrada del original. El voltaje de salida es:

$$E_o = 2 \cdot \left(1 + \frac{1}{K}\right) \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot (E_2 - E_1)$$

### Amplificador que usa tres amplificadores operacionales

El circuito de la figura 9-3 permite obtener ganancia ajustable linealmente dependiente de un valor de resistencia, simultáneamente con elevada impedancia de entrada, elevada ganancia, y elevado rechazo de modo común.

Los dos amplificadores de entrada constituyen un amplificador separador diferencial con una ganancia de modo diferencial definida por los valores de los resistores externos y una ganancia unitaria para las señales de modo común que luego son eliminadas por la etapa de salida.

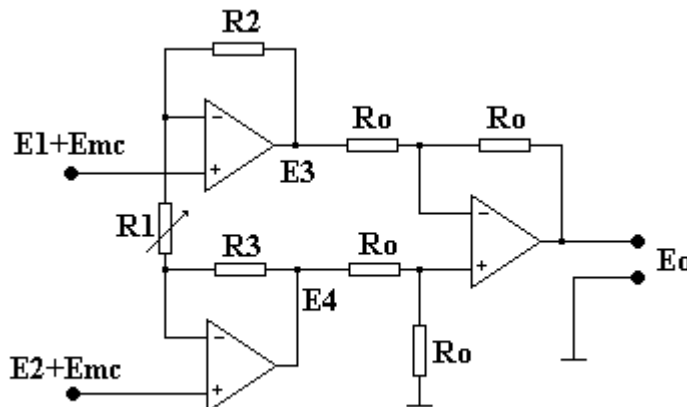


Figura 9-3.

El análisis del circuito, utilizando el mismo criterio que para el de un solo amplificador, da las siguientes ecuaciones:

La salida del amplificador E3 será:

$$E_3 = E_{(+)} + E_{(-)} \quad ; \quad E_{(+)} = (Emc + E_1) \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad ; \quad E_{(-)} = -(Emc + E_2) \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

Operando y simplificando:

$$E_3 = E_1 \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - E_2 \cdot \frac{R_2}{R_1} + E_{mc}$$

De manera análoga, la expresión para la salida del amplificador E4 será similar:

$$E4 = E2 \cdot \left(1 + \frac{R3}{R4}\right) - E1 \cdot \frac{R3}{R1} + E_{mc}$$

Para el cálculo de la salida Eo, directamente se efectúa la diferencia entre E4 y E3, ya que la etapa de salida es similar al circuito de la figura 1 pero con ganancia unitaria.

$$Eo = E4 - E3$$

Si además se hace  $R2 = R3$ , se tendrá :

$$Eo = (E1 - E2) \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{R2}{R1}\right)$$

Como se deduce de esta expresión, la ganancia queda fijada por la relación entre R2 y R1, que puede variarse modificando el valor de R1 (que es común a ambas entradas).

La impedancia de entrada es elevada debido a que los amplificadores de entrada están conectados en la configuración no inversora. Los efectos que pueden producir una eventual desigualdad de R2 y R3, se reducen a un error de ganancia sin afectar el rechazo de modo común. Como la etapa de salida tiene ganancia unitaria, los errores debidos a las corrientes y tensiones de off-set son mínimos, y por la misma causa mejora la relación de rechazo de modo común.

### Amplificadores de puentes

Probablemente la utilización mas común de los amplificadores de instrumentación, la constituye el uso que de ellos se hace como amplificadores de salida de los circuitos que usan puentes de CC para la medición de magnitudes físicas por medio de transductores resistivos.

En un circuito en puente de CC, uno de los brazos del puente es un resistor variable con la magnitud a medir. La figura 9-4 muestra una de estas aplicaciones.

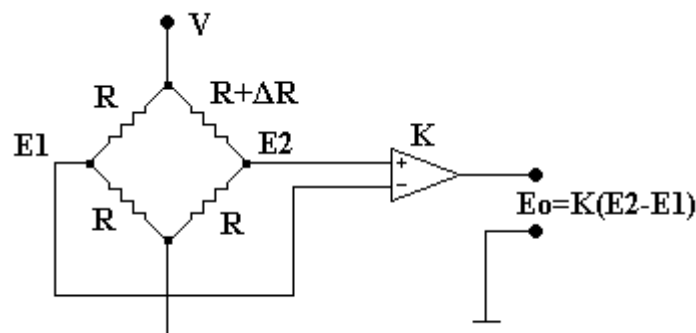


Figura 9-4

La tensión en cada nudo de salida del puente será:

$$E2 = V \cdot \frac{R}{2 \cdot R + \Delta R} \quad ; \quad E1 = \frac{V}{2}$$

La tensión diferencial de salida del puente será:

$$E2 - E1 = \frac{-V \cdot \delta}{4 \cdot (1 + \frac{\delta}{2})}$$

(Donde  $\delta = \Delta R/R$ )

La tensión de salida del amplificador, suponiendo que la ganancia del mismo es K será:

$$Eo = K \cdot (E2 - E1) = \frac{-K \cdot V \cdot \delta}{4 \cdot (1 + \frac{\delta}{2})}$$

Si en la ecuación anterior el valor de  $\delta$  es mucho menor que 1, entonces se tendrá:

$$Eo = -K V (\delta / 4)$$

Es decir que la tensión de salida es función lineal de la variación del elemento activo solamente para pequeños cambios porcentuales en dicho elemento.

### ***Transductores utilizados.***

La cantidad y tipo de transductores que existen y las técnicas de medición empleadas, es muy amplia. Algunos tipos convierten la variación de la magnitud física de interés en un cambio de la resistencia de un conductor, pero también los hay de capacidad, de inductancia, e incluso de tensión o corriente.

Una clasificación de las distintas clases de transductores podría hacerse teniendo en cuenta si estos requieren algún tipo de alimentación externa, o si, en cambio, son capaces de entregar directamente una señal eléctrica de salida que pueda excitar un instrumento de medición o un amplificador de instrumentación. El cuadro que sigue es un resumen que se ha confeccionado según esta idea. Mas adelante se describirán algunos de los tipos mas comunes de transductores empleados en sistemas de medición e instrumentación industrial.

**Transductores – Clasificación.****Que requieren una fuente de energía externa.**

<b>Tipo</b>	<b>Principio de funcionamiento</b>	<b>Aplicaciones</b>
<b>Resistencia</b>		
Dispositivo potenciométrico	La posición de un cursor varía mediante la aplicación de una fuerza externa	Desplazamiento (lineal, angular), presión
Galgas extensométricas	La resistencia de un alambre o semiconductor varía según la elongación o compresión debido a la aplicación de esfuerzos externos	Fuerza, par, pequeños desplazamientos.
Medidor de alambre caliente “Pirani”	El flujo de un gas enfría un alambre variando su resistencia	Flujo de gases.
Termistores	La resistencia de un alambre metálico o filamento semiconductor varía con la temperatura	Temperatura
Higrómetro de resistencia	La resistencia de una cinta sobre la que se deposita un compuesto químico resistivo, varía con el contenido de humedad.	Humedad relativa
Foto resistores	Ciertos semiconductores varían su resistencia ante la incidencia de radiación luminosa	Luz y radiación
<b>Capacidad</b>		
Medidor de capacidad variable – micrófono de capacitor	Una fuerza aplicada externamente varía la distancia entre de dos placas paralelas	Presión, sonido, ruido.
Medidor dieléctrico	La capacidad varía por cambios en el dieléctrico.	Nivel de líquidos, espesor
<b>Inductancia</b>		
Transformador diferencial LVDT	El voltaje diferencia entre dos devanados varía al varía la posición de un núcleo magnético	Desplazamientos (del orden de los cm).
Medidor de magnetostricción.	Las propiedades magnéticas cambian por presión y esfuerzo	Fuerza, presión, sonido (de gran intensidad)
<b>Voltaje y/o corriente</b>		
Detector por efecto Hall	Se genera una diferencia de potencial a través de una placa semiconductor (Ge) cuando un flujo magnético interactúa con la corriente que circula.	Flujo magnético, intensidad de corriente.
Celda foto emisiva (diodos foto detectores)	Hay emisión de electrones debido a la incidencia de una radiación en la superficie fotosensible.	Luz y radiación.

**Que no requieren una fuente de energía externa.**

Termopar y/o termopilas	Se genera una FEM en la unión de dos metales cuando la misma se calienta.	Temperatura, radiación, flujo de calor
Generador de bobina móvil.	El movimiento de una bobina en un campo magnético genera un voltaje.	Velocidad, vibración, sonido
Detector piezoeléctrico.	Se genera una FEM cuando una fuerza se aplica a ciertos materiales cristalinos como el cuarzo, o cerámicos sintéticos.	Sonido, vibración, aceleración, cambios de presión.
Celdas fotovoltaicas	Se genera voltaje en un dispositivo de unión semiconductor cuando la energía radiante estimula la celda	Medición de intensidad luminosa, celdas solares

### Transductores para pequeñas deformaciones – Galgas extensométricas.

Un tipo de transductores muy utilizados para la medición de pequeñas deformaciones son los extensómetros (o “galgas extensométricas”, que se basan en la propiedad de los conductores eléctricos de variar su resistencia al ser sometidos a un esfuerzo mecánico. Fundamentalmente consisten en un conductor largo y muy fino, dispuesto de manera tal que una pequeña deformación (o desplazamiento) produzca la mayor elongación posible. Esto se logra dando al conductor una forma ondulada y plana, y cementando todo el conjunto sobre un trozo de papel o resina, que se adhiere al objeto cuyas deformaciones se desean medir. De esta manera, un pequeño alargamiento (del orden de centésimas de mm) en el sentido predominante del conductor se traduce en un gran alargamiento de este, con la variación de resistencia consiguiente. Normalmente la variación relativa de resistencia es de 2 a 4 veces la variación relativa de longitud. Una galga, en realidad, es sensible a variaciones muy pequeñas de longitud sobre uno de sus ejes, y se puede utilizar por ejemplo, para implementar un transductor capaz de medir la presión de un fluido o gas, si la misma se adosa a un tubo de Bourdon preparado específicamente para ese fin.

Para que uno de estos transductores mantengan un funcionamiento lineal, la fuerza aplicada no debe deformar el material del mismo mas allá del 50% de su límite de deformación elástico a fin de que una vez que el esfuerzo se haya dejado de aplicar la galga retorne a su valor original.

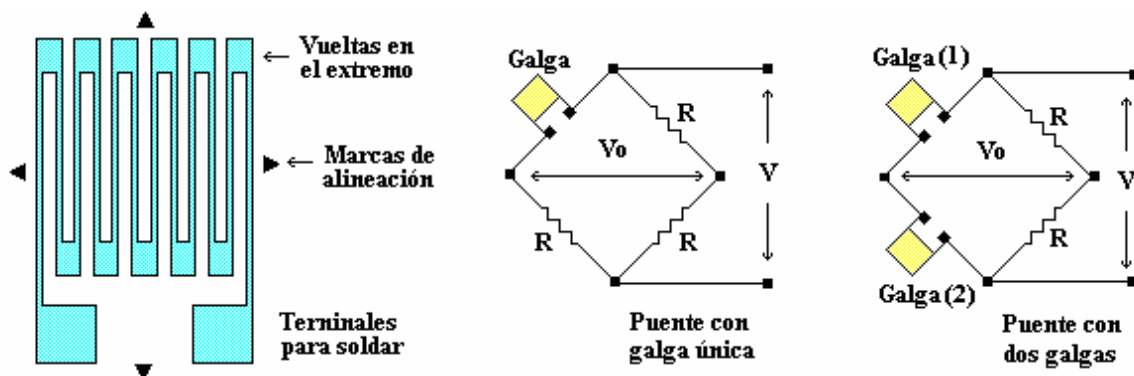


Figura 9-5 . Galga extensométrica - Ejemplos de montaje en puente.

La mayoría de las galgas se fabrican de manera que la resistencia varíe linealmente con los cambios de longitud siendo la principal especificación que las diferencia entre sí, el factor de galga (K) que se define como:

$$K = \frac{\Delta R / R_g}{\Delta L / L}$$

Donde :

$\Delta R$  = Cambio de la resistencia de la galga

$R_g$  = Resistencia nominal de la galga

$\Delta L$  = Cambio de la longitud de la galga

$L$  = Longitud de la galga en reposo.



Las galgas extensométricas, son ampliamente utilizadas para medir la deformación producida en un material o la fuerza que la produce. La “ley de Hooke” formula cual es la relación que existe entre el esfuerzo y la tensión mecánica a que es sometido un material (suponiendo que la relación es lineal) en términos del modulo de elasticidad del mismo:

$$\sigma = \frac{s}{E} = \frac{\Delta L}{L}$$

Donde:

$\sigma$ = Tensión, (adimensional)

L= Longitud en el sentido en que se aplica la tensión mecánica.

$\Delta L$ =Variación de L en el sentido de deformación

s= esfuerzo, kg/cm<sup>2</sup>

E= Modulo de elasticidad, kg/cm<sup>2</sup>

**Ejemplo:** Una galga extensométrica cuyas especificaciones son: R= 120 ohms , K= 2 , se adhiere a una barra de acero que esta sometida a un esfuerzo s=1000 kg/cm<sup>2</sup> . El modulo de elasticidad del acero empleado es, aproximadamente, E=2 x 10<sup>6</sup> kg/cm<sup>2</sup> . ¿ Cual es el cambio en la resistencia de la galga debido al esfuerzo aplicado?

**Solución.** La ley de Hooke nos da:

$$\sigma = \frac{s}{E} = \frac{\Delta L}{L} = \frac{1000}{2 \times 10^6} = 5 \times 10^{-4}$$

Teniendo en cuenta el factor de galga:

$$K = \frac{\Delta R / R_g}{\Delta L / L} \quad \therefore \quad \Delta R / R = K \cdot \sigma = 2 \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 10^{-3}$$

Valor que expresado en porcentaje equivale al 0,1%. Luego el 0,1% de 120 ohms es:

$$\Delta R = 0,12 \text{ ohms.}$$

Para evitar los errores producidos por cambios de temperatura (que producen variaciones de resistencia comparables con las se que originan por la deformación a medir), se usan circuitos de puentes con dos galgas extensométricas adyacentes. Una de ella permanece inactiva mientras que la otra se aplica sobre el objeto a medir (Véase el esquemas de la figura 9-5).

Como los dos son afectados de igual manera por la variación de temperatura, los errores se compensan, y el desequilibrio del puente se deberá solamente a la deformación.

Cuando se desconoce la dirección principal de la deformación a medir se colocan extensómetros especiales, compuestos por tres o cuatro extensómetros simples orientados en distintas direcciones. A partir de las diversas indicaciones de cada uno de ellos se puede calcular la dirección y magnitud de la deformación.

### Transductores para variaciones de longitud o desplazamientos

El segundo tipo de transductor que mide variación de longitudes (pero que se usa mas que todo para desplazamientos) es el "Transformador diferencial variable lineal" (conocido por sus siglas en ingles LVDT). Este dispositivo es útil para desplazamientos del orden del mm. se utiliza la variación de inductancia que se produce en un transformador diferencial, al desplazarse su núcleo. Consta de un arrollamiento primario conectado a una fuente de CA. y dos secundarios conectados en oposición.

Cuando el núcleo del transformador se encuentra en su posición de reposo, la tensión inducida en cada uno de los bobinados secundarios es idéntica y se cancelan entre si (por estar conectados en oposición). Al desplazarse el núcleo, se produce un incremento de tensión en uno de los bobinados a la vez que una disminución en el otro. Así, la tensión total será proporcional al desplazamiento del núcleo y su fase en relación con la tensión del primario, indicara el sentido del desplazamiento.

Generalmente estos dispositivos se construyen tratando de que la relación entre el desplazamiento sentido y la salida eléctrica del mismo sea lineal. La linealidad de un transformador diferencial LVDT se define como la desviación máxima de la curva de salida de la línea recta de mejor ajuste que pasa por el origen, expresada como un porcentaje de la salida nominal. Por ejemplo, si la salida de un transformador lineal LVDT es 5,00 V a un desplazamiento de 12,5 mm, y la desviación máxima de la curva de salida , de la línea recta a través del origen es 0,006 V, la linealidad es entonces:

$$\text{Linealidad} = \frac{\text{desviación}}{\text{salida}} = \frac{0,006 \text{ V}}{5,00 \text{ V}} = 0,12 \%$$

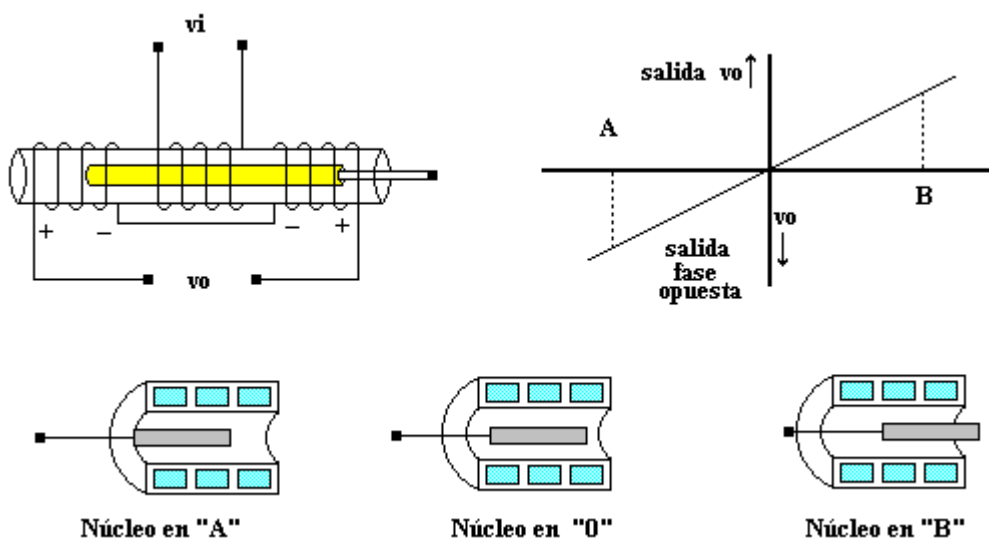


Figura 9-6. Transformador diferencial

Generalmente la tensión de salida del transformador actúa sobre un servomecanismo, que desplaza automáticamente un cursor con un índice y una escala hasta una posición tal que su desplazamiento corresponda con el desplazamiento del núcleo.

Algunos sistemas utilizan dos transformadores conectados siguiendo la técnica del balance nulo. Eliminando de esta manera los errores por alinealidades de los transformadores.

## Transductores de presión

La presión de un fluido puede medirse en forma indirecta si la misma se usa para producir un desplazamiento mecánico usando extensómetros o transformadores lineales. También se puede medir si la misma modifica en forma directa algún parámetro eléctrico como la capacidad. En la siguiente figura se muestra el esquema de un transductor de capacitor variable. La presión de referencia del transductor de este ejemplo puede ser la presión atmosférica (para medición de presión relativa), el vacío (para medición de presión absoluta, o un fluido como segunda presión de interés (para mediciones de presión diferencial)

Un diafragma metálico se mueve dentro del transductor aproximándose o alejándose de una placa rígida y por tanto causa un cambio en la capacidad de la estructura. Si se hace que el valor de la capacidad sea parte de un circuito oscilador, la frecuencia del mismo cambiara al cambiar el valor de la capacidad.

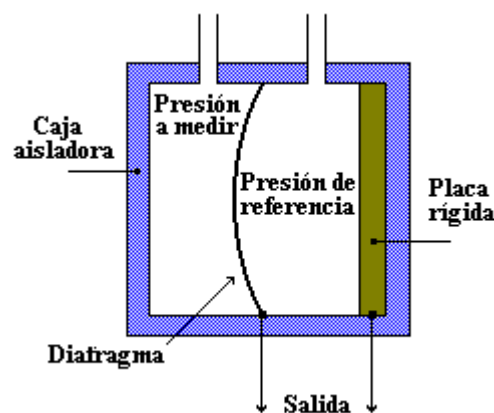


Fig. 9-7.

Otra manera de obtener una salida eléctrica consiste en cargar el capacitor en reposo con una fuente de elevada impedancia; si luego se modifica la capacidad manteniéndose fija la carga, la tensión a bornes del mismo se modifica puesto que :

$$C = Q/V$$

Donde :

Q = Carga acumulada en las armaduras del capacitor

V = Tensión a bornes del capacitor

C = Capacidad del sensor.

### ***Introducción a los sistemas de instrumentación.***

Los sistemas electrónicos de medición son conjuntos de instrumentos, dispositivos y subsistemas en general interconectados entre sí cuya propósitos es llevar a cabo una función general de medición. Además de efectuar correctamente su función individual, los elementos que componen el sistema deben trabajar eficazmente en conjunto, lo cual pone en evidencia la importancia de una adecuada interconexión que permita el funcionamiento general de manera coordinada y compatible.

En la actualidad, el trabajo de Ingeniería en los sistemas de instrumentación consiste principalmente en el acondicionamiento de señales y la interconexión de instrumentos u otros dispositivos ya existentes (pocas veces también se requiere el desarrollo de aparatos de medición que no existen previamente).

El tema de la interconexión de instrumentos es bastante amplio. Se pueden encuadrar dentro del mismo ejemplos que corresponden a situaciones tan dispares como pueden ser: La conexión de un generador de barrido y marcas con un osciloscopio para efectuar el ajuste de la curva de respuesta de un amplificador, o la interconexión de distintos sensores con un sistema de adquisición de datos y una computadora para implementar un sistema de medición o banco de pruebas de motores a explosión.

Podemos darnos por satisfechos si como resultado del presente estudio, se obtiene una visión general suficientemente clara como para que el estudiante tenga en el futuro al menos una idea de por donde empezar a encarar el problema si se le plantea una situación de este tipo.

Para empezar el estudio por alguna parte se lo hará intentando hacer una clasificación desde el punto de vista de la forma en que se efectúan las interconexiones (o interfases).

La coexistencia de técnicas de mediciones analógicas con digitales cuando se trata de implementar un sistema de instrumentación origina alguna de las siguientes situaciones:

1. ***Interconexión de instrumentos o subsistemas analógicos con analógicos.*** (Sistemas Analógicos)
2. ***Interconexión de instrumentos o subsistemas analógicos con digitales.*** (Sistemas Analógicos Digitales).
3. ***Interconexión de instrumentos o subsistemas digitales con digitales.*** (Sistemas Digitales).

Se describirán a continuación cada una de las situaciones apuntadas teniendo en cuenta que muchos de los temas y aspectos abordados en el presente estudio ya han sido tratados anteriormente en forma aislada. Por ese motivo, los conceptos e ideas que se dan a continuación constituyen una visión de conjunto del asunto y no se estudiará directamente cada subsistema o componente si no que en lo posible se hará referencia al punto o ítem en el cual se estudió previamente el mismo.

### ***Sistemas Analógicos.***

Los sistemas compuestos en base a dispositivos totalmente analógicos fueron los primeros en aparecer y por ello la mayoría de los problemas relacionados con su implementación están resueltos. Sin embargo su uso es limitado a aquellas situaciones no demasiado complejas (es decir donde las variables involucradas son pocas) en las que se puede tolerar una menor exactitud y en las que se necesita un amplio ancho de banda. (Procesos que varían rápidamente en el tiempo).

Los elementos típicos que componen un sistema pueden ser todos o algunos de los siguientes:

- **Fuentes de señal:** Son elementos que producen señales como resultado de la medición directa de una magnitud eléctrica o que convierten otro parámetro físico en una señal (Transductores).
- **Elementos que acondicionan las señales analógicas:** Tales como; amplificadores, filtros, adaptadores de impedancia, etc.
- **Instrumentos de medición propiamente dichos:** Tales como voltímetros, osciloscopios, etc.
- **Instrumentos de registro gráfico:** Por ejemplo registradores sobre papel.
- **Grabadores analógicos de cinta magnética.**

Para interconectar adecuadamente todos los elementos de los sistemas analógicos se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Igualación de impedancias de salida y cargas.
- Transmisión adecuada de las señales analógicas.
- Disminución o eliminación de ruidos e interferencias.
- Puesta a tierra adecuada de los instrumentos (tanto desde el punto de vista de la eliminación de ruidos o interferencias como de la seguridad).

Algunos de los problemas de interconexión que deben resolverse ya se han descrito con anterioridad por ejemplo al estudiar el tema relacionado con los amplificadores de instrumentación y el tratamiento y eliminación de interferencia mediante sistemas de guarda.

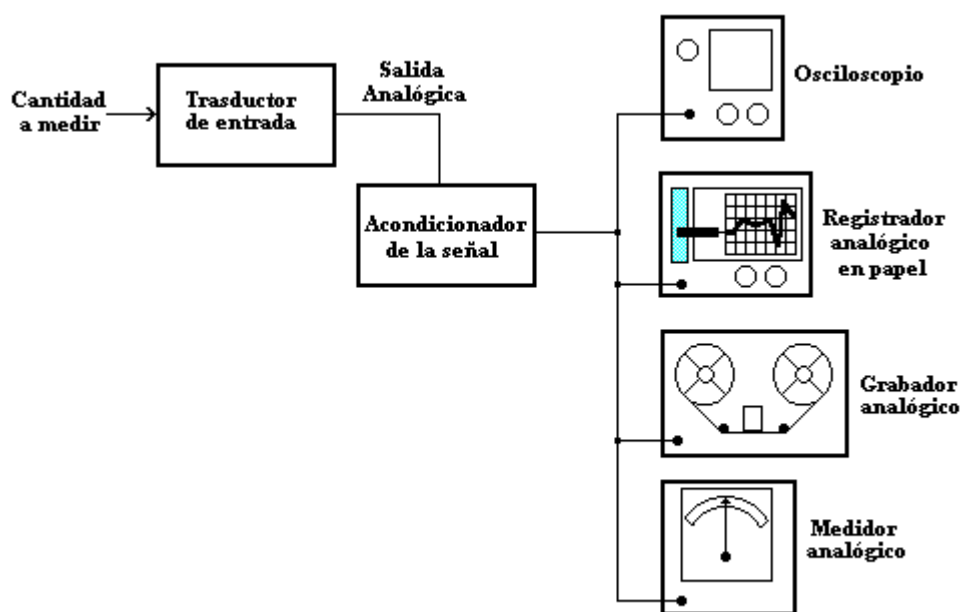


Fig 9-8. Ejemplo de un sistema sencillo de medición analógica

El elemento o bloque clave de un sistema de medición como el que se muestra es el acondicionador de señal analógica.

Las señales analógicas provenientes de fuentes o transductores raramente tienen la forma o nivel necesario para mostrarse o registrarse directamente. Generalmente se las debe hacer

pasar primero por una serie de procesos de acondicionamiento entre los cuales pueden estar todos o algunos de los siguientes: Amplificación, filtrado, linealización, corrimiento y amortiguación. El proceso de amplificación (y algunas veces el de corrimiento) se lleva a cabo mediante amplificadores de instrumentación. Hay firmas comerciales que canalizan sus actividades principalmente a este segmento de la técnica y han desarrollado una múltiple variedad de dispositivos apropiados para este uso.

### **Transmisión de señales analógicas.**

La transmisión de señales entre los diversos dispositivos de un sistema de medición es otro de los puntos claves para el buen funcionamiento del mismo.

La transmisión de señales analógicas de bajo nivel a larga distancia es muy susceptible de degradarse debido a captación de ruido externo y a las pérdidas por resistencia de los conductores particularmente cuando las longitudes son considerables. Por lo tanto generalmente se emplean uno de los siguientes dos métodos.

- **Transmisión de Voltaje analógico:** Si la distancia es menor de unos 30 metros, se aumenta el nivel de la señal mediante el empleo de amplificadores de instrumentación. Los niveles de voltaje habituales son entre 0 y 10 V, con estos valores y con la adopción de buenos blindajes y guardas la degradación es mínima. Desde el punto de vista económico, el método es menos costoso que el de transmisión de corriente que se describe a continuación.
- **Transmisión de corriente analógica:** Para distancias mayores de 30 metros y hasta unos 3 Km. se prefiere emplear una señal analógica de corriente. Se usa por lo general un valor de corriente que fluctúa entre 4 mA (nivel de señal cero) y 20 mA (nivel máximo). El método es sumamente seguro porque prácticamente se independiza de las variaciones aleatorias de resistencia de los conductores usados (por ejemplo por temperatura); además la falta repentina de corriente en el circuito es un síntoma claro de una falla en el sistema (observe que el nivel cero de señal no corresponde a un nivel cero de corriente).

### ***Sistemas Analógicos Digitales.***

Los sistemas de Medición en los cuales los datos medidos se adquieren en forma analógica, pero a continuación se convierten a forma digital antes de mostrarlos o transmitirlos tienen un uso muy amplio. Con mas frecuencia se emplean cuando la señal eléctrica o el proceso físico que se está monitoreando presenta un estrecho ancho de banda (un ejemplo sería una señal o proceso que varía muy lentamente) y cuando se necesita una gran exactitud.

Los sistemas Analógicos Digitales pueden ser desde muy sencillos (con un único canal de entrada) hasta mas complejos con múltiples canales de entrada.

La principal ventaja de estos sistemas es que poseen una inmunidad mucho mayor a la captación de ruidos que un sistema totalmente analógico.

Un sistema analógico a digital puede contener algunos o todos los elementos que se detallan a continuación:

- **La fuente de señal** (Señal eléctrica directa o de transductor).
- **Un multiplexor** (En los sistemas multicanal).

- **Acondicionador de señal** (Amplificador, filtro, etc.)
- **Circuito de muestra retención** (Cuantifica la señal analógica)
- **Convertor A/D** (Se describieron al estudiar los voltímetros digitales).
- **Dispositivo de Control del sistema** (Habitualmente un microprocesador o una computadora).

Los multímetros digitales (Particularmente los que permiten medir magnitudes no eléctricas como por ejemplo temperatura) pueden ser considerados como un ejemplo sencillo de un sistema analógico a digital.

Un ejemplo mas complejo de un sistema analógico a digital es el sistema de adquisición y conversión de datos cuyo diagrama en bloques se muestra a continuación.

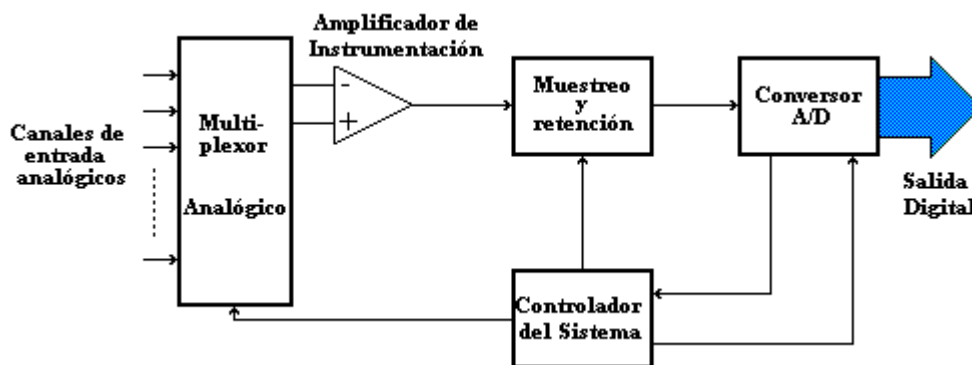


Fig. 9-9. Configuración sencilla de un sistema multicanal analógico a digital.

El sistema que se muestra en la figura 9-9 es el ejemplo mas sencillo de una manera en la que se puede configurar un sistema de adquisición de datos multicanal. Esta configuración parece apropiada porque da un sistema de bajo costo y eficiente ya que se usa un único amplificador de instrumentación que se comparte con todas las entradas mediante el multiplexor analógico. Sin embargo hay algunas desventajas que deben tenerse en cuenta a la hora de efectuar una elección y que se apuntan a continuación:

- 1) Como se amplifica después de multiplexar, se debe tener cuidado en la elección del multiplexor apropiado que debe tener entrada y salida diferencial y manejar los niveles de entrada que eventualmente pueden ser de bajo nivel (es decir  $<1V$ ).
- 2) Debido a las limitaciones impuestas por el modo en que trabajan los convertidores A/D, es difícil manejar rangos dinámicos amplios entre los distintos canales de entrada del multiplexor. Por lo tanto el sistema es aplicable siempre y cuando todas las señales de entrada al sistema tengan amplitudes que estén dentro del mismo margen de valores.

Finalmente, los tiempos de asentamiento de los canales de entrada pueden variar ampliamente si las fuentes de señal presentan diferentes impedancias al amplificador de instrumentación del sistema.

Como resultado de estas limitaciones, esta configuración sencilla no es aplicable en todos los casos. Se debe optar por una variante como la que se muestra a continuación:

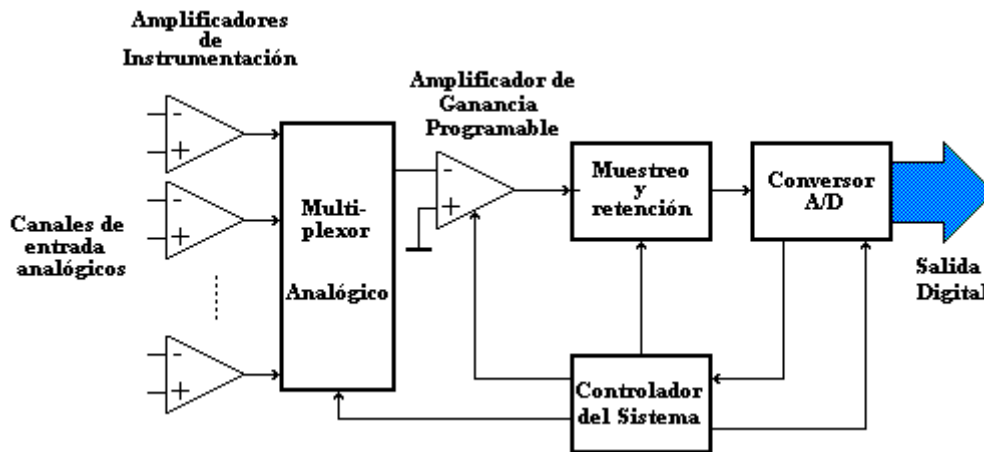


Fig 9-10. Sistema de adquisición de datos con acondicionamiento previo.

En los sistemas que se implementan con la filosofía del diagrama de la figura 9-10 la adopción de amplificadores individuales para cada una de las entradas posibilita un mejor comportamiento ante la presencia de señales de entrada menores de 1V o con rangos dinámicos grandes. Además la presencia del amplificador de ganancia programable mediante señales externas provenientes del controlador optimiza el funcionamiento del convertor A/D.

Un aspecto importante a tener en cuenta es que en los dos casos anteriores se debe ubicar el conjunto de dispositivos que manejan señales analógicas lo mas cerca posible de las fuentes de señal a fin de reducir los problemas de ruidos e interferencia. Cuando esto es dificultoso o imposible se debe pensar en adoptar alguna solución en la cual la conversión A/D se haga en las cercanías de la fuente de señal y la transmisión y su posterior multiplexado se efectúe con señales totalmente digitales; el esquema de la figura 9-11 es un ejemplo de este tipo de sistema.

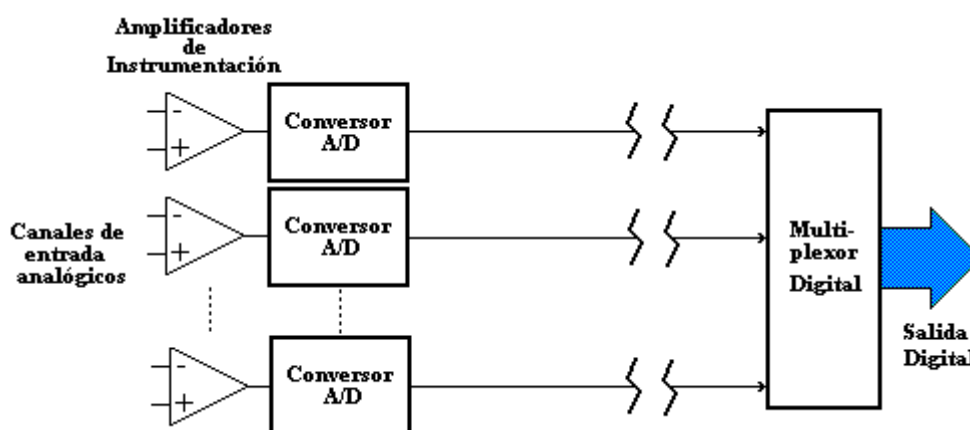


Fig 9-11. Configuración de un sistema en el que las señales analógicas de entrada se convierten individualmente en señales digitales

En este tipo de configuración, cada canal aplica la señal de entrada a su propio conjunto Amplificador / Convertor A/D que está ubicado muy cercano a la fuente de señal, la salida digital de cada canal se transmite entonces a un multiplexor digital que no necesita estar en



las cercanías del dispositivo. La transmisión digital de datos reduce la posibilidad de degradación originada por la captación de ruido externo y por las pérdidas en los conductores. Generalmente los conversores A/D usados son del tipo de integración (Doble rampa o Conversor tensión frecuencia) lo que elimina la necesidad de usar circuitos de muestra - retención.

A partir de un sistema como el descrito se abre una perspectiva distinta del problema planteado hasta ahora, que puede resumirse en la siguiente pregunta: ¿Como se transmiten o bajo que normas o condiciones se manipulan los datos digitales producidos?. La respuesta a esta pregunta se dará al tratar el tema de interconexión de instrumentos o subsistemas digitales que se verá seguidamente.

### ***Sistemas Digitales***

Los datos medidos y convertidos a formas digitales o los que provienen de dispositivos o instrumentos propiamente digitales se pueden transmitir a sus puntos de destino usando las técnicas apropiadas a distancias virtualmente ilimitadas. Además, la transmisión de datos puede llevarse a cabo en una forma altamente eficiente y prácticamente sin error.

El tema general de la transmisión de datos digitales y de la interconexión de subsistemas es muy extenso y excede los objetivos del presente curso. Abarca técnicas de transferencia de datos dentro y entre computadoras, de computadoras a periféricos (Impresoras, Unidades de memoria, Teclados, etc.) y entre instrumentos y computadoras. Justamente este último punto es el de mayor interés para el curso de mediciones electrónicas y en este se centrará el esfuerzo.

La transmisión de datos en sistemas de instrumentación se efectúa para cumplir alguno de los siguientes dos funciones:

- 1) **Adquisición de datos** en tiempo real, en la cual esencialmente se envían datos del instrumento o sistema al dispositivo de presentación (por ejemplo datos provenientes de un transductor que se envían para su registro en una impresora).
- 2) **Adquisición y control de datos** en tiempo real, en la cual hay un intercambio de datos y señales de control entre los dispositivos o instrumentos (Por ejemplo un sistema de medición automático que requiere un generador de señales cuya frecuencia debe variarse a medida que se efectúa el proceso; en ese caso un dispositivo tal como una computadora, recibe datos y envía señales de control al generador para variar su frecuencia).

**Distintas formas de enviar señales en forma digital.**

La transmisión de datos o señales de control en forma digital se pueden efectuar de alguna de las siguientes maneras.

1. En paralelo
2. Decimal codificado binario (BCD)
3. Barra de distribución IEEE-488
4. Barra de distribución CAMAC
5. En serie, asincrónica.

En realidad la lista precedente no es una clasificación en el sentido clásico del término ya que por ejemplo: La barras de distribución IEEE-488 y CAMAC son sistemas de interconexión que pueden clasificarse como interfases paralelas, y el sistema BCD puede ser tanto paralelo como serie. El objeto principal del presente curso es el estudio de la barra de distribución IEEE-488 y la norma o estándar asociada a la misma por lo cual se describirá primero brevemente el concepto general en que se basan las interfases paralelas.

Los datos digitales se transmiten a lo largo de trayectos que pueden consistir físicamente en conductores, ondas de radio, microondas, enlaces ópticos, etc. Estos trayectos reciben el nombre genérico de “Barras de distribución”, o mas comúnmente “Bus de datos”, y consisten en líneas de datos propiamente dichas mas un conjunto de líneas de control necesarias para sincronizar el funcionamiento del sistema).

Los datos digitales que se transmiten deben estar codificados en algún formato digital apropiado y en forma de una palabra de por ejemplo 8 bits. Si todos los bits que componen la palabra se transmiten simultáneamente, esto se llama **transmisión paralelo** (nótese que para esto es necesario contar con una línea individual para cada bit). La interfase paralelo es apropiada para sistemas en los cuales las partes componentes del mismo no se encuentran demasiado alejadas entre si. Para largas distancias el costo de proporcionar una línea para cada bit puede ser excesivo y en este caso se prefieren usar métodos que usan un solo conductor o línea para transmitir los datos y señales de control en **serie** (es decir, un bit a la vez).

Los datos en todos los sistemas (en serie o, paralelo) pueden ser transmitidos en forma sincrónica o asincrónica. La transmisión sincrónica requiere del envío de pulsos de reloj para sincronizar el conjunto. La velocidad de transferencia de datos puede ser muy alta , pero la distancia entre equipos debe ser necesariamente reducida y la implementación es compleja y costosa. Por lo tanto la transmisión sincrónica y en paralelo se limita a transferencia de datos dentro de y entre computadoras.

La transmisión de datos asíncrona se lleva a cabo sin el empleo de pulsos de sincronización o reloj. En lugar de ello se necesita transmitir señales de reconocimiento (handshake) entre los dispositivos transmisores y receptores. El reconocimiento es una técnica en la que el dispositivo transmisor manda un pulso que dice “Datos listos” y queda en espera hasta que el receptor envíe a su vez un pulso que significa “De acuerdo” luego de lo cual recién se efectúa la transmisión. Los sistemas rudimentarios en paralelo requieren al menos dos líneas extras para llevar a cabo esta función. El reconocimiento en sistemas asíncronos en serie se lleva a cabo de manera diferente ya que no es posible disponer de líneas extras.

## Bus IEEE-488

El estándar (o norma) IEEE-488 es una interfase paralelo del tipo asíncrona. Se lo conoce también con el nombre Bus de interfase de propósito general (o sus siglas en inglés GPIB). Es útil hacer la distinción entre el estándar IEEE-488 y el bus IEEE-488. El estándar es un documento que enuncia las reglas, especificaciones, relaciones de sincronización, características físicas, etc. de una técnica de interfase que permite interconectar instrumentos y dispositivos digitales. El Bus IEEE-488 son partes físicas (conductores, conectores, etc...) que se emplea para implementar el estándar..

El estándar define las especificaciones eléctricas, mecánicas y funcionales de la interfase de instrumentos. Las especificaciones eléctricas describen los parámetros eléctricos de las señales digitales transmitidas en el bus (como voltajes y corrientes que corresponden a los niveles lógicos, etc.). Las especificaciones mecánicas definen la configuración física (número de conductores, tipo de conector, designación de patas, etc.). Las especificaciones funcionales determinan el uso preciso de cada una de las líneas de señal, las reglas (protocolo) que se deben seguir para transferir correctamente mensajes a través de la interfase incluyendo el procedimiento de reconocimiento. A continuación se describen las mas importantes de estas especificaciones.

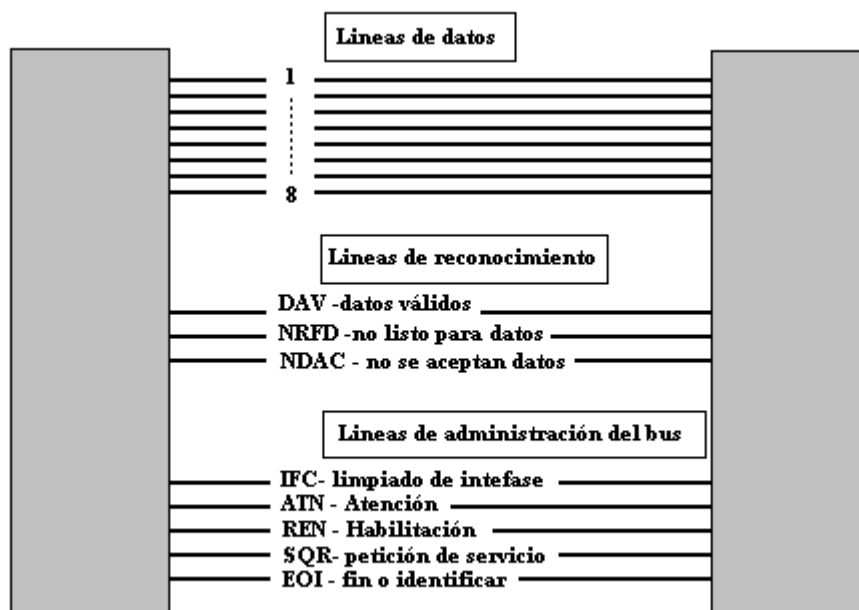


Fig 9-12. Estructura del Bus IEEE-488

La estructura del bus IEEE-488 comprende dieciséis líneas de señal de las cuales ocho son líneas de señal propiamente dichas, tres son para la función de reconocimiento, y cinco líneas para funciones de administración del bus.

Se pueden conectar hasta 15 instrumentos en casi cualquier modo al bus, si la longitud total del cable no es mayor de 20 metros.

Se pueden transmitir datos con velocidades de hasta 1 Mbyte por segundo (aunque las velocidades reales casi nunca son mayores de 500 Kbyte por segundo).

Las señales transmitidas son compatibles con los niveles TTL, aunque se emplea una convención lógica negativa).

El formato de codificación digital no está definido por la norma y por lo tanto como no hay garantía que los instrumentos usen todos el mismo formato en general sucede que dos instrumentos interconectados con el sistema IEEE-488 pueden ser siempre capaces de hablar uno con otro, pero no siempre son capaces de comprenderse entre sí. Sin embargo conviene decir que la mayoría de los instrumentos que adoptan la norma están preparados para usar el código ASCII ya que es el utilizado por las computadoras personales que se utilizan habitualmente como controladores.

Los instrumentos y dispositivos conectados al bus están agrupados en cuatro categorías:

- 1) **Los controladores** (Por ejemplo: computadoras o calculadoras digitales), que administran la operación y dirigen el flujo de datos en el bus.
- 2) **Los escuchas** (Por ejemplo: Impresoras, registradores etc.) que solo son capaces de recibir datos.
- 3) **Los mensajeros** (Por ejemplo: los voltímetros digitales y sistemas de adquisición de datos), que solo pueden enviar datos sobre el bus a los escuchas.
- 4) **Los mensajeros/escuchas** (Por ejemplo: los multímetros digitales y los generadores de señales cuya frecuencia puede controlarse externamente), que tienen la capacidad tanto de recibir o mandar datos (en ese sentido también los controladores deben tener capacidad de funcionar como mensajeros y como escuchas).

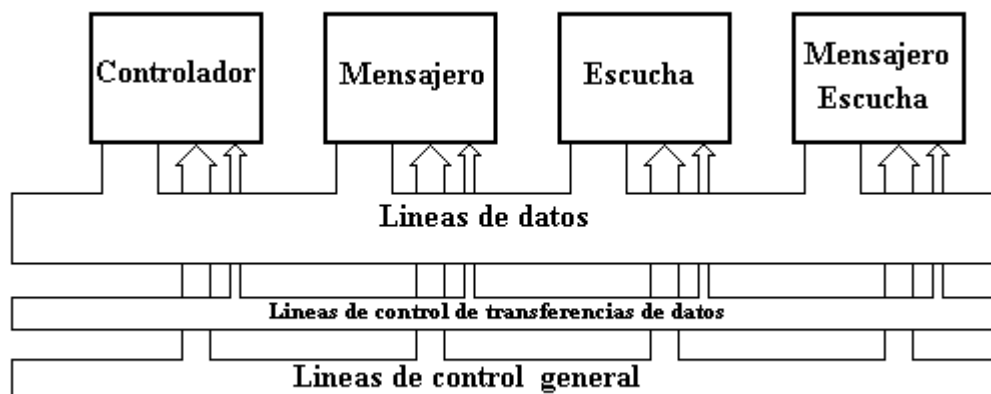


Fig. 9-13. Estructura de un sistema en base al bus IEEE-488

Para diferenciar cada dispositivo o instrumento se emplea una técnica denominada “direccionamiento”. Cada uno de los instrumentos tiene una dirección única la cual puede definirse de antemano mediante un juego de llaves o puentes que poseen generalmente en un lugar accesible hay cerca del conector del bus.

Los conceptos e ideas que se acaban de exponer son rudimentarios, pero sirven como una introducción para encarar el estudio más detallado del estándar a fin de resolver un problema específico de interconexión de instrumentos para implementar un sistema de instrumentación.

**Preguntas y problemas:**

- 1) El esquema clásico de un amplificador de instrumentación utiliza tres amplificadores operacionales. Generalmente se emplea uno de estos amplificadores como etapa de salida y se lo diseña para que tenga un valor de ganancia específica. ¿Cuál es el valor de ganancia que suele tener esta etapa de salida? . Justifique la respuesta.
- 2) ¿En que circunstancias se suelen emplear una conexión de galga extensométricas inactiva, y cual es su función?
- 3) Una galga extensométrica cuyas especificaciones son:  $R = 120 \text{ ohms}$  ,  $K = 2$  se dispone en una conexión puente junto con tres resistores fijos de valor nominal igual a  $120 \text{ ohms}$ . El puente se alimenta con una tensión continua de  $10\text{V}$ . La galga se adhiere a una viga de acero que será sometida a un esfuerzo  $s = 1000 \text{ kg/cm}^2$  . El modulo de elasticidad del acero empleado es aproximadamente  $E = 2 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$  . ¿Cual es la tensión diferencial de salida del puente cuando la viga es sometida al esfuerzo indicado?
- 4) En los sistemas de medición y/o control suele ser necesario transmitir una señal analógica de un punto a otro del sistema. Hay básicamente dos técnicas, una es la transmisión de voltaje analógico, y la otra es la transmisión de corriente analógica. Diga en que situación se emplea transmisión de corriente analógica y enumere cuales son las ventajas que supone el empleo de este método.