
APUNTE de CÁTEDRA:

Tema: INSTRUMENTOS DIGITALES

1 Contenido:

1	Contenido:	1
2	Objetivos.....	3
3	Introducción.....	3
3.1	Comparación entre Instrumentos Analógicos y Digitales.	3
4	Principales Componentes de un Instrumento Digital	5
4.1	Compuertas Lógicas:	5
4.2	Flip-Flops:	6
4.3	Contadores	7
4.3.1	Contador Binario Natural Asincrónico:	7
4.3.2	Contador Binario Decimal Asincrónico:	8
4.3.3	Contador Binario Natural Sincrónico:	8
4.3.4	Contador Binario Decimal Sincrónico:	9
4.4	Indicadores de Cifras ·	10
4.4.1	Dispositivos de Despliegue:	11
4.5	Amplificadores Operacionales:	12
4.5.1	El amplificador Usado como Comparador de Tensiones o Detector de Cero:	13
4.5.2	El Amplificador Operacional con Realimentación Negativa	13
4.5.3	Amplificador Operacional Usado como Integrador:	14
4.5.4	Resumen de Circuitos con Amplificadores Empleados en Instrumentación.....	15
5	Esquema Básico de un Instrumento Digital.	16
5.1	Ejemplos Comunes de Acondicionadores	17
5.1.1	Atenuador de Corriente Continua.....	17
5.1.2	Atenuador de CC con Amplificador	18
5.1.3	Convertor de Corriente Tensión:.....	19
5.1.4	Convertor Resistencia Tensión	19
6	Voltímetros Digitales.....	20
6.1	Tipos de Conversores Analógicos - Digitales más Utilizados	21
6.1.1	Voltímetro con convertor A/D de rampa o conversión tensión - tiempo.....	21
6.1.2	Voltímetro digital con convertor A/D de doble rampa	23
6.1.3	Voltímetro con convertor A/D de modulación de pulsos delta.....	26
6.1.4	Voltímetro de conversión A/D por tensión - frecuencia.....	29

6.1.5 Voltímetro de conversión A/D por aproximaciones sucesivas.....	31
7 Frecuencímetros Digitales	34
7.1 Error de +- 1 cifra:	36
7.2 Errores del Frecuencímetro Digital	37
8 Medición Digital de un Período	37
9 Algunas Características de los Instrumentos Digitales.....	38
9.1 Flexibilidad.....	39
9.2 Número de Dígitos y Sobrerrango.....	39
9.3 Sensibilidad y Resolución	40
9.4 Exactitud:.....	40
9.5 Estabilidad a Corto Plazo	41
9.6 Coeficiente de Temperatura.....	42
9.7 Rapidez de Respuesta	42
9.8 Impedancia de Entrada	43
9.9 Función HIGH LOW	43
9.10 Tensiones Parasitas.....	43
9.11 Otras Funciones	43

2 Objetivos.

- Plantear nociones básicas sobre el funcionamiento de los principales conversores ADC utilizados en los instrumentos digitales.
- Interpretar correctamente la hoja de datos de un instrumento digital.
- Determinar el error cometido al utilizar un instrumento digital.

3 Introducción.

La evolución tecnológica de los instrumentos digitales está ligada a la evolución de la electrónica en general. La aparición de los circuitos integrados y de los microprocesadores permite a los constructores la ejecución de multímetro e instrumentos digitales cada vez con mayor exactitud.

Si bien los instrumentos analógicos continúan siendo utilizados para muchas aplicaciones, gracias al avance de la microelectrónica y la progresiva disminución de costos, los instrumentos digitales dominan el mercado actual.

3.1 Comparación entre Instrumentos Analógicos y Digitales.

En los instrumentos analógicos vistos hasta ahora el resultado de la medición está dado por la posición del índice sobre la escala. En los instrumentos digitales el resultado aparece en un visor con sus cifras enteras, a veces con decimales, con caracteres arábigos e incluso a veces con la indicación de la unidad usada.

Un multímetro analógico por ejemplo está constituido esencialmente por un sistema de imán permanente y bobina móvil asociado a una red de resistencias que sirven de multiplicadoras y shunts para la medición de diferentes rangos de tensión y corriente. Se dice que el instrumento es analógico porque la magnitud de entrada está medida de una manera *continua*, es decir, con movimiento análogo a la magnitud que se mide.

En cambio, en los instrumentos digitales la medición es *discreta*, es decir, solo puede tomar un conjunto de valores posibles al pasar por una conversión analógica-digital. El instrumento digital transforma por medio de un conversor analógico-digital la magnitud eléctrica (que es analógica) en un valor equivalente digital (discreto).



Figura 1: Esquema básico de un instrumento digital

Las técnicas utilizadas para efectuar esta conversión son variadas, (luego se analizará cada una por separado), pero el resultado es el mismo: la magnitud de entrada analógica es convertida e indicada bajo una forma numérica con una resolución y exactitud que depende esencialmente de las cualidades del conversor analógico-digital utilizado.

Es de hacer notar que la resolución y exactitud de los conversores analógico-digital (de aquí en adelante los simbolizaremos ADC) resultan de 10 a 100 veces mayor que los mejores instrumentos analógicos. Esto explica por qué el instrumento digital se ha convertido rápidamente en el instrumento de laboratorio por excelencia.

Si bien en los últimos años el mercado ha sido invadido por una gama de instrumentos digitales, y su costo con el correr del tiempo tiende a disminuir, no puede afirmarse que suplantarán definitivamente a los analógicos, pues los entendidos en las técnicas de medición, y más específicamente los técnicos que trabajan en reparaciones, encuentran en el instrumento analógico una mejor disposición a la detección de una falla, ya que en ciertos casos el movimiento o la posición de la aguja puede otorgar una información rápida que no es tan sencilla de interpretar en los instrumentos digitales.

Es por ésta razón que algunas firmas del mercado de instrumentos han incorporado los adelantos electrónicos en los conocidos instrumentos de bobina móvil, logrando un aumento de la sensibilidad con la introducción de amplificadores con circuitos integrados. De esta forma se combinan las ventajas de la tecnología analógica con la tecnología digital para lograr el máximo aprovechamiento de las ventajas que ambas brindan.

En la siguiente tabla se resumen características comparativas entre los instrumentos digitales y analógicos.

<i>Característica</i>	<i>Instrumento Analógico</i>	<i>Instrumento Digital</i>
Técnica de Indicación	Cuadro Móvil-Piezas en movimiento-Fragilidad	Equipado con LED: consumo alto, respuesta rápida. Equipado con LCD: consumo bajo, respuesta lenta
Exactitud	0.1% hasta 3%	0.01% o menos hasta 2%
Facilidad de lectura	Errores de paralaje Error de Estimación Poder separador del ojo	No admite dudas en la lectura
Resolución	Baja	Muy elevada
Relación costo/prestación	Alta	Baja
Duración de baterías en multímetro	Aprox. 1000 Hs.	LED: decenas de horas. LCD: 200hs a 1 año
Polaridad	la lectura es función de la polaridad (puede sufrir daños por polaridad incorrecta)	Conmutación automática con indicación de polaridad
Resistencia de entrada	varios miles de Ω/V	varios $M\Omega$
Conmutación Escala	Manual	Automática

Resumen de ventajas y desventajas comparativas de cada tecnología:

	<i>Instrumento Analógico</i>	<i>Instrumento Digital</i>
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Indica la tendencia de la magnitud a controlar • Ajuste rápido de cero. • No entrega corriente al circuito. (a excepción del óhmetro) • Mantenimiento nulo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Posibilidad de transmitir medición a distancia. • Puede incorporar cálculos complejos. • Alta resolución. • Alta impedancia de entrada. • Fácil lectura.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Baja exactitud. • Cierta fragilidad mecánica. • Desajuste de cero. • Error en las lecturas (función del instrumento – observador). • Alto consumo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dificultosa lectura en señales inestables. • Mantenimiento complejo. • Su costo crece exponencialmente con su exactitud. • Puede necesitar calibración frecuente.

4 Principales Componentes de un Instrumento Digital

La salida de algunos de los convertidores A/D más empleados en instrumentos digitales (de doble rampa y de voltaje a frecuencia que veremos luego) es una cadena de pulsos. Los pulsos se cuentan durante un intervalo de tiempo predeterminado mediante un contador digital decimal codificado binario (BCD) y la cuenta resultante representa el valor de la lectura de la señal de entrada en forma digital.

El contenido del contador se pone a disposición como una salida digital en paralelo que se puede transmitir a otros dispositivos de almacenamiento digital o se puede decodificar para activar un mecanismo de despliegue o presentación. A continuación se describen con mayor detalle los elementos que intervienen en el procedimiento de conteo-decodificación-despliegue.

4.1 Compuertas Lógicas:

La técnica digital opera de modo que todos los dispositivos lógicos (compuertas) realizan sus operaciones adoptando uno de dos valores diferentes (valores bajos o altos de tensión: digamos 0 V y 5 V por ejemplo). A estos dos únicos valores posibles los distinguiremos diciendo:

- entrada de nivel 0: (0V)
- entrada de nivel 1: (5 V para nuestro ejemplo)

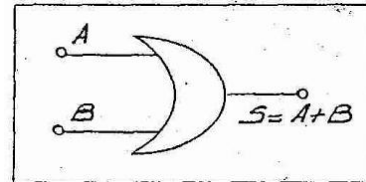
A estos valores de entrada le corresponderá a la salida del dispositivo lógico también niveles 1 ó 0, según las características del mismo. Esto puede interpretarse como combinaciones de interruptores que conectan o no: SI ó NO; ALTO ó BAJO, CERRADO ó ABIERTO. Se sabe que es posible manejar tal sistema mediante el álgebra de Boole.

En la técnica digital las operaciones fundamentales son:

- 1) Suma "OR"
- 2) Multiplicación "AND"
- 3) Inversión "NOT"

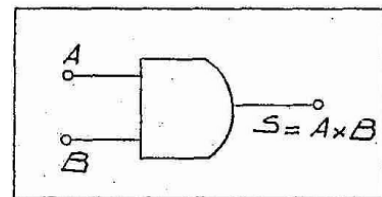
• Suma "OR"

A	B	C
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1



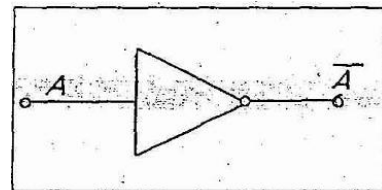
• Multiplicación "AND"

A	B	C
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1



• Inversión "NOT"

A	\bar{A}
0	1
1	0



4.2 Flip-Flops:

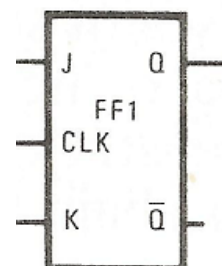
El flip-flop (FF) es un dispositivo constituido básicamente por dos transistores interconectados de modo que cuando uno conduce el otro está bloqueado. Existen varios tipos de FF. El que nosotros veremos es el llamado JK con entrada de reloj (clock).

En el FF JK con conexión de reloj por flanco descendente, los cambios de estado de la salida del FF se producen sincronizadamente con el cambio de nivel de 1 a 0 de la señal de reloj aplicada a la entrada "clock". En otros FF el cambio se produce cuando la señal pasa de 0 a 1 (flanco ascendente). Nosotros analizaremos el primer sistema (FF JK por flanco descendente).

La tabla de verdad para un FF JK está indicada en el cuadro:

J	K	clock (CLK)	Q
0	0	↓	No cambia
0	1	↓	0
1	0	↓	1
1	1	↓	Cambia

NOTA: Los cambios se producen en el instante en que la entrada de clock pasa del estado 1 a 0.



En el cuadro anterior se ve que si J y K son diferentes, Q estará en el mismo valor que J (el contrario de K). Si ya lo tenía allí queda, de lo contrario cambiará y lo hará cuando la señal de clock pase de 1 a 0.

Si J y K son ambos 1, Q cambiará su estado cualquiera que sea en el instante que clock pase de 1 a 0.

Por último, si J y K están en cero el clock queda inhibido: Su pasaje de 1 a 0 no produce ningún cambio en Q.

4.3 Contadores

4.3.1 Contador Binario Natural Asincrónico:

El contador de propagación binaria (**asíncrono**) es el tipo más básico de todos. Acopla cuatro flip-flop JK conectados según se muestra en la Figura 2 incrementando en el código binario (los flip-flop se activan con el flanco posterior del impulso).

El circuito de la Figura 2 tiene una característica especial que se reconoce en cualquier circuito de este tipo: La salida del primer flip-flop dispara al segundo, FF2, por su entrada de impulsos de reloj; la salida de FF2 dispara a FF3 y la salida de FF3, a su vez, dispara a FF4. De esta forma, el efecto de un impulso de reloj introducido en la entrada de FF 1, se propagará de un flip-flop a otro hasta que llegue al último de la serie. Por este motivo se lo llama contador de propagación, y también contador serie.

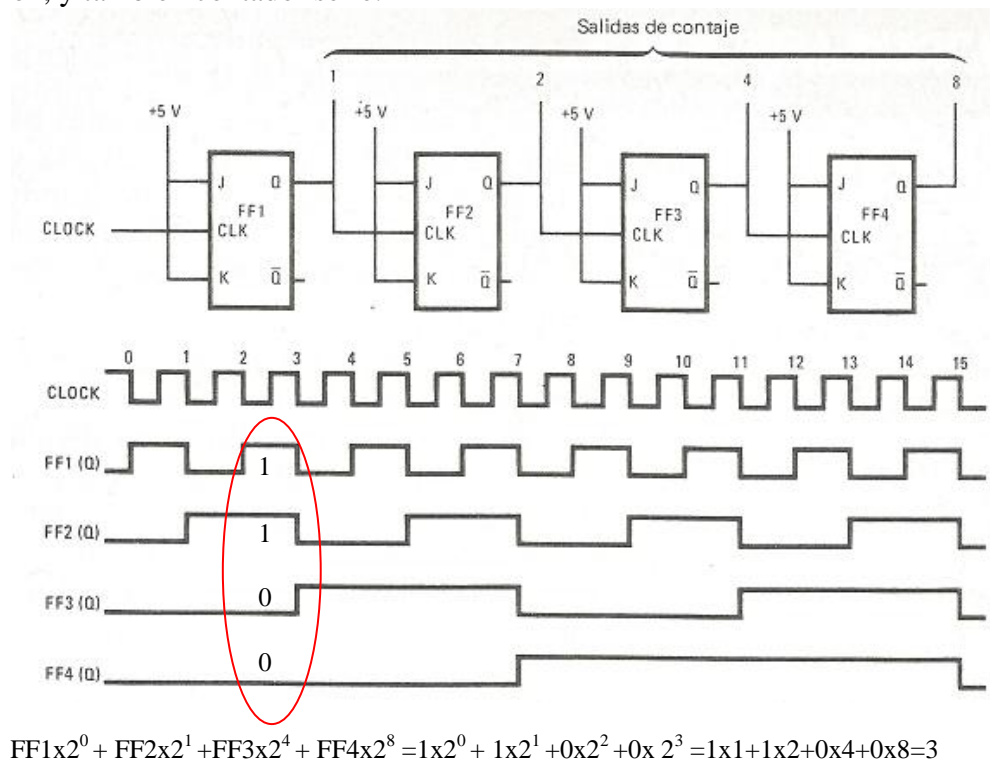


Figura 2: contador asíncrono de 0 a 15.

Para analizar el contador ascendente asíncrono, obsérvese que cada flip-flop JK tiene sus entradas J y K en lógica 1. Esto hace que el flip-flop bascule (cambie de estado) cada vez que se recibe un impulso de reloj. Puesto que la salida de un flip-flop está conectada a la entrada de reloj del siguiente, cada flip-flop cambia de estado con una periodicidad que es la mitad de la del flip-flop anterior (podría pensarse como un divisor de frecuencia). En el diagrama de tiempos de la Figura 2 puede verse que esta acción de dividir por dos cada flip-flop crea

cambios de estado en cada salida Q que se adaptan al código binario, contando pulsos entre 0 y 15.

4.3.2 Contador Binario Decimal Asincrónico:

Es uno de los más utilizados, está construido a base de 4 flip-flops JK y una puerta NAND la cual pone en 0 los flip-flops al llegar la cuenta máxima de 10 (1010_2). De esta manera se puede utilizar este conjunto de flip-flops para contar unidades, otros cuatro para contar decenas, centenas, etc. Para conseguir este tipo de contador de bits, se utiliza una entrada de reset, “clear” o borrado, la cual se activa inmediatamente después de la cuenta más alta que se necesite, en este caso en la cuenta 1010_2 , colocando los flip-flops en 0 lógico nuevamente.

El código decimal binario (BCD, Binary Coded Decimal) es una forma de expresar cada uno de los dígitos decimales (de 0 hasta 9) con un código binario. El código 8421 es un tipo de código decimal BCD. La designación 8421 indica los pesos binarios de los cuatro bits ($2^3, 2^2, 2^1, 2^0$) es decir (8,4,2,1).

Como se dijo, un contador un contador de 4 bits como el de la Figura 2 llega a una cuenta máxima binaria de 1111 que equivale a 15 en decimal, por lo que si se le agrega un compuerta NAND que se activa inmediatamente después de la cuenta 1001 (9 en decimal), el contador contará solo de 0 a 9 en código 8421.

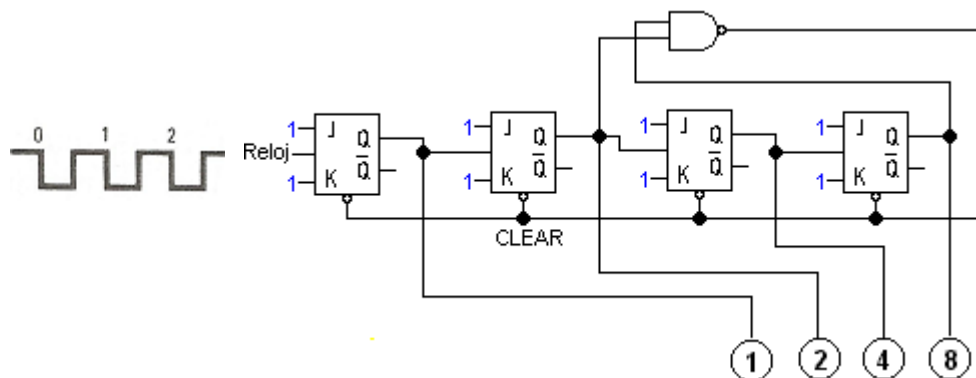


Figura 3: Contador asincrónico de 0 a 9.

Una característica importante de cualquier contador es la velocidad con que puede funcionar. Si cada flip-flop de la Figura 2 o de la Figura 3 tiene un retardo de propagación de 25 nanosegundos, el retardo total desde el momento en que se aplica a FF1, el flanco posterior de un impulso de reloj, hasta que FF4 haya completado su cambio de estado es de 100 ns. Por lo tanto, el siguiente flanco de impulso de reloj no puede tener lugar hasta 100 ns más tarde. Durante este tiempo los flip-flop cambian de estado y la salida del contador será incorrecta. No todos los flip-flop deben cambiar su estado con cada impulso de reloj, pero cuando se avanza en el cómputo de 7 a 8 o cuando se repite el ciclo desde el 15 al 0 todos los flip-flop cambian de estado y la señal de reloj debe estar inactiva el tiempo suficiente para permitir esto. Por esta razón se han desarrollado los contadores síncronos.

4.3.3 Contador Binario Natural Sincrónico:

Los contadores **síncronos** se basan en el mismo circuito flip-flop JK que los contadores asíncronos, exceptuando que todos los flip-flop son activados mediante una señal de reloj común y, por tanto, todos cambian de estado sincrónicamente (al mismo tiempo). Las entradas J y K de cualquier flip-flop están conectadas a las salidas Q de todos los flip-flop anteriores que hay en la

cadena del contador a través de una compuerta AND. Por lo tanto, cualquier flip-flop se activará cuando la compuerta AND que se aplica a las entradas J y K, tengan una lógica 1 y esto se produce únicamente cuando todos los flip-flop anteriores de la cadena están en estado 1.

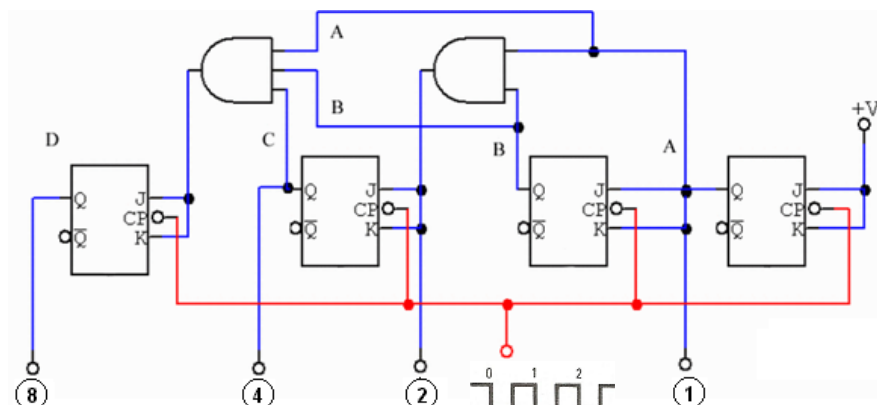


Figura 4: Contador síncronico de 0 a 15

4.3.4 Contador Binario Decimal Sincrónico:

El contador BCD Sincrónico mostrado en Figura 5 funciona igual que cualquier otro contador 8421 desde el 0 hasta el 9 (1001) y luego retorna al 0.

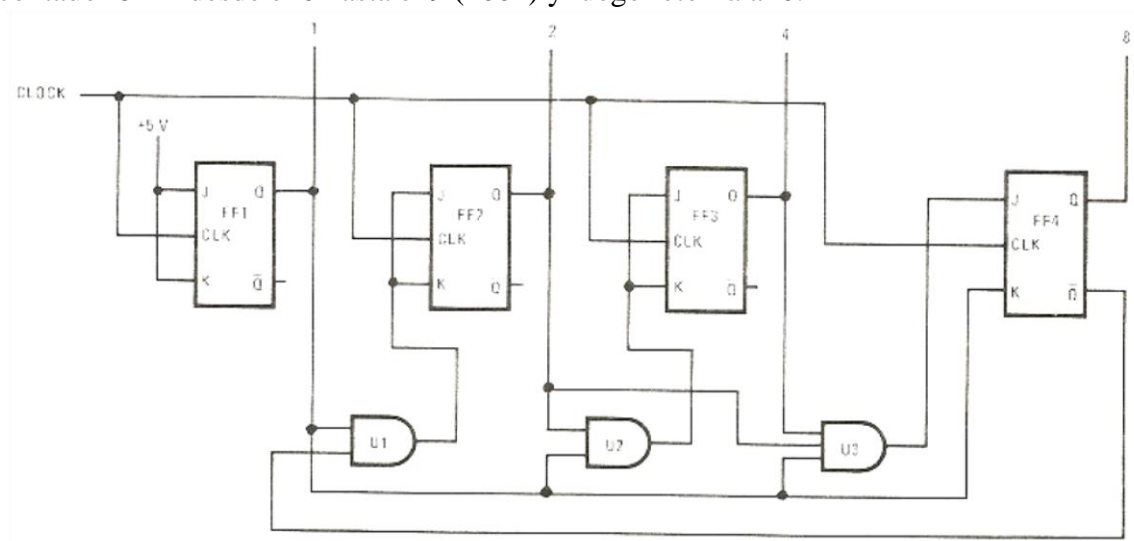


Figura 5: Contador síncrono BCD de 0 a 9.

Para conseguir este retorno han de efectuarse dos conexiones singulares. En principio, para mantener FF2 en el estado 0 (que la cuenta no pase a 10 en decimal), en el siguiente impulso de reloj que hay detrás del estado 1001 (estado 9), Q de FF4 se conecta a la entrada de la puerta AND U1. En este instante, la salida Q de FF4 es de nivel lógico 0 y por tanto las entradas J y K de FF2 son de nivel lógico 0 y FF2 no puede cambiar a nivel 1 en el siguiente flanco del impulso de reloj. En segundo lugar y, para hacer que FF4 vuelva a 0, Q de FF1 se conecta directamente a K de FF4. Como consecuencia de esta conexión, la entrada K pasa de alta a baja continuamente de modo alternativo y por tanto FF4 se mantiene en el estado 0. Para contar el número 7, todas las entradas a U3 se hacen altas y aparece una señal alta, tanto en J como en K de FF4. Por consiguiente, en el siguiente impulso de reloj (cómputo de 8), FF4 bascula al estado 1. El estado 1 permanece después de que tiene lugar el impulso de reloj posterior (contaje 9), porque ahora el Q de FF1 es 0, suprimiendo así el nivel lógico 1 tanto de J como de K de FF4. Para el cómputo de 9, Q de FF1 pasa a 1 otra vez y por tanto FF4 tiene una entrada K alta, pero continua aún teniendo baja la entrada J. Por eso en el siguiente impulso de reloj, FF4 retoma nuevamente al estado 0.

Otra forma de implementar es como en la Figura 6. Para forzar el paso de 9 a 0 (y no 10) y recomenzar la cuenta se utilizan compuertas AND y una OR.

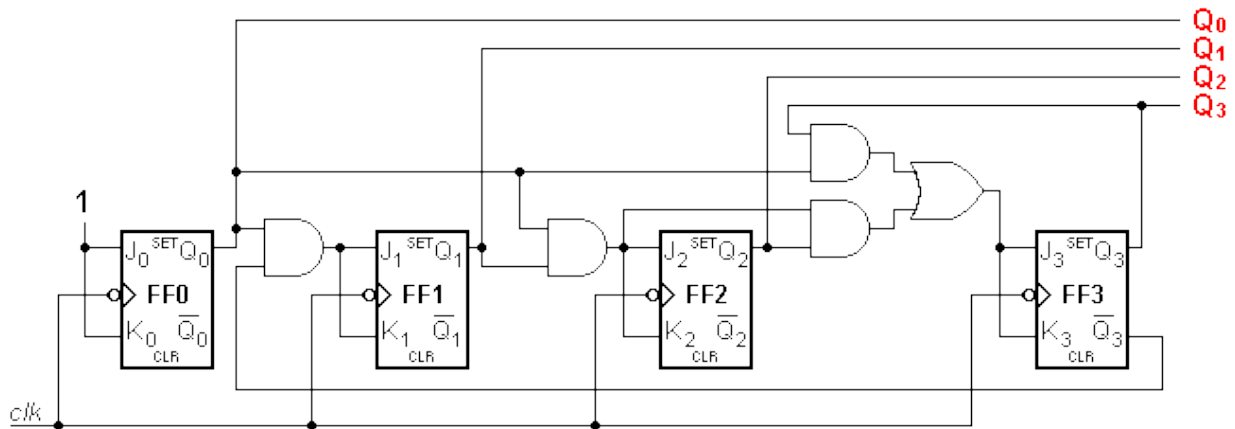


Figura 6

4.4 Indicadores de Cifras:

Los valores numéricos y de medición se indican mediante cifras luminosas formadas por líneas luminosas continuas o por elementos reticulados puntiformes de trazos. El mando de los mismos se efectúa a través de un decodificador que transforma los valores numéricos, dados generalmente en el código BCD en los impulsos necesarios para el mando de cada una de las cifras o de los elementos reticulados.

Si un contador decimal codificado binario de 4 bits, recibe un pulso cuando está en su estado 10012, el pulso regresará (restablecerá) el contador al estado 00002 y también hará que emita un pulso de salida. Si hay un segundo contador de 4 bits conectado al primero en cascada, el pulso de salida del primer contador avanzará los contenidos del segundo en una cuenta. Los 10 estados de cada contador de 4 bits pueden representar a los dígitos decimales de 0 a 9. Por ejemplo, en número decimal 26, el dos estaría representado cuando el contenido del segundo contador de 4 bits estuviera en el estado 0010, mientras que el seis estaría representado cuando el contenido del primer contador estuviera en el estado 0110. El contenido de cada uno de los contadores de 4 bits está disponible como una señal digital de bits en paralelo a través de las líneas de señal 8-4-2-1 de cada contador, como se muestra en la Figura 7. El decodificador convierte la representación BCD a señales adecuadas para activar a los dispositivos de despliegue (pantallas).

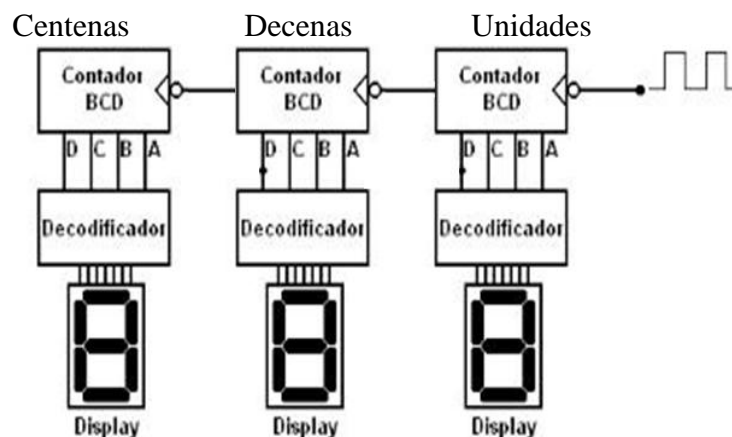
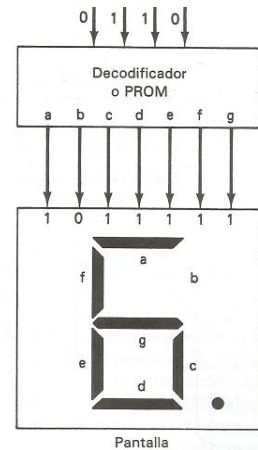


Figura 7

4.4.1 Dispositivos de Despliegue:

La mayor parte de los dispositivos de despliegue modernos son diodos emisores de luz (LED, iniciales de Light Emitting Diode) de siete segmentos o pantallas de cristal líquido (LCD, iniciales de Liquid Crystal Display).

En la Figura de la derecha, las salidas del decodificador activan los segmentos de despliegue para representar el dígito decimal 6. (La identificación normal de los segmentos es de la "a" a la "g", como también se muestra en la Figura). Para desplegar el "6", se iluminan los segmentos a, c, d, e, f y g, mientras que b permanece a oscuras.



Indicadores de cristal líquido (LCD)

Los indicadores de cristal líquido no emiten luz, solo difunden la luz ambiental. Esto los hace útiles aún en ambientes muy iluminados. Por lo tanto, en condiciones de baja iluminación, las pantallas se deben iluminar por detrás.

Entre dos placas paralelas con electrodos de SnO_2 y a una distancia de 6 a 25 micrones se encuentra una sustancia orgánica normalmente transparente, que bajo el efecto de una intensidad de campo eléctrico de 0,5 V/micrón se vuelve turbio-lechosa. La indicación no tiene iluminación propia y se hace visible con luz de reflexión o incidencia. Las ventajas de un LCD son una buena sensibilidad para la lectura independiente de la iluminación del ambiente y la escasa demanda de potencia de 0,1 mW/m². Así, las pantallas de cristal líquido encuentran empleo en aplicaciones donde es importante un bajo consumo de potencia. Sin embargo, las pantallas de cristal líquido responden mucho más lento que los diodos emisores de luz, y esto constituye una desventaja para algunas aplicaciones.

Indicadores con diodos emisores de luz

Los diodos emisores de luz (LED'S) son semiconductores que emiten luz cuando se les aplica una corriente que produce una recombinación entre los electrones y huecos cerca de la unión p-n. Los materiales semiconductores más empleados para la elaboración de un LED son GaP y Ga-As-P.

Para producir caracteres numéricos se emplean 7 segmentos o arreglos de puntos 3x9, mientras que para producir letras deben emplearse 14 segmentos o arreglos 5x7 (ver Figuras).

El umbral de conducción de un LED está alrededor de 1,7 V lo que los hace compatibles con la mayoría de circuitos lógicos integrados. Son por lo general de pequeñas dimensiones y emiten luz roja.



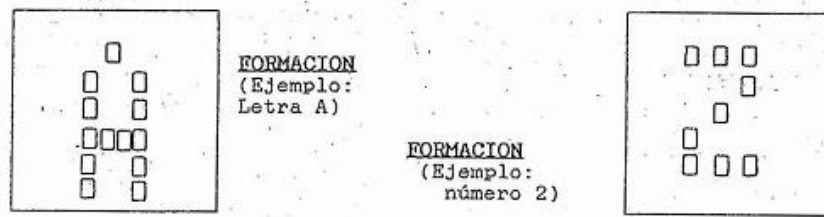


Figura 8: Indicadores alfanuméricos

Antes de que se generalizara el empleo de los diodos y de los cristales líquidos, se usaban ampliamente las lámparas miniatura de neón y las incandescentes. El tubo Nixie (de neón), producto Burroughs y el tubo Numitron (incandescente), producto RCA, son dos ejemplos.

4.5 Amplificadores Operacionales:

Un amplificador operacional es otro de los elementos básicos que componen un instrumento digital.

Un amplificador operacional es un dispositivo eléctrico constituido por un circuito más o menos complicado, que, mediante transistores y las correspondientes fuentes de energía permite alimentar por sus bornes de salida a un circuito eléctrico, con una potencia que idealmente es proporcional en todo momento a la potencia (y mayor que aquella) que cierto generador de señal entrega a sus bornes de entrada. En otras palabras, un amplificador es un cuadripolo activo con una tensión de entrada V_e y una salida V_s .

Se llama GANANCIA de tensión G a la expresión:

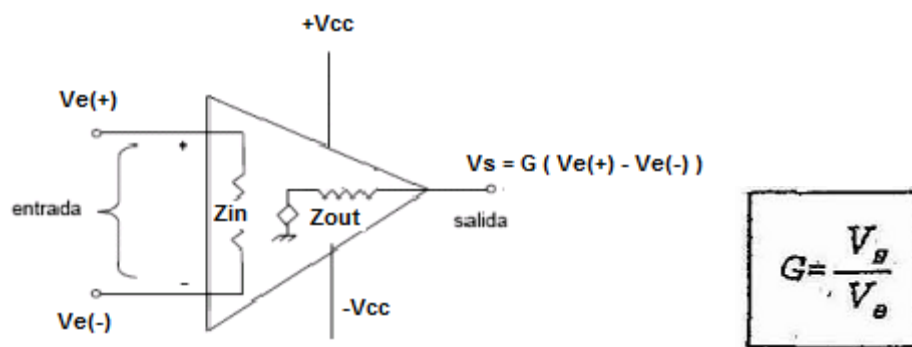


Figura 9

Los amplificadores diferenciales, Figura 9, tienen dos entradas independientes, ($V_e(+)$ y $V_e(-)$), y amplifican por un factor "G" la diferencia entre las dos tensiones conectadas a esas dos entradas.

El amplificador operacional que identificaremos con las siglas "AO" usado ampliamente en instrumentos digitales, es un amplificador diferencial de corriente continua caracterizado por:

- Una gran ganancia de tensión a circuito abierto en la salida:

$$G = \frac{V_{s_o}}{V_e}$$

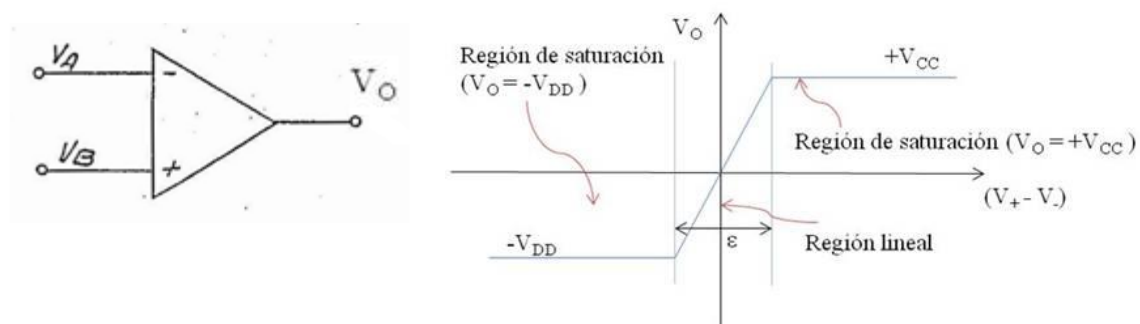
La ganancia es del orden de 10^4 a 10^7 y aún 10^9 . En las consideraciones que hagamos supondremos que es infinitamente grande.

- Una impedancia de entrada (Z_{in}) muy alta, idealmente infinita.

4.5.1 El amplificador Usado como Comparador de Tensiones o Detector de Cero:

Se aprovecha su gran ganancia de tensión. Las tensiones que quieren compararse se conectan a sus bornes de entrada que llamaremos A y B. Como ya se dijo, el AO amplifica la diferencia entre ellas.

Como las dos entradas son de distinta polaridad, si la V_A (conectada a la entrada negativa), es mayor que V_B (conectada a la entrada +) aunque solo sea una fracción de micro voltios, la salida toma valor $V_s = G (V_B - V_A)$, pero como G es extremadamente grande resulta que V_s se hace igual a la tensión de alimentación del AO. Si inversamente disminuye lo necesario para ser ahora apenas menor que V_B la tensión de salida cambiará al máximo valor positivo.



Evidentemente, el dispositivo es apto para señalar instantáneamente el momento en que las dos tensiones sean iguales. Obviamente, si uno de los bornes está conectado a masa (tensión nula) el AO diferencial se transforma en un detector de cero, es decir da una señal cuando la tensión pasa por cero.

4.5.2 El Amplificador Operacional con Realimentación Negativa

La R_2 de la Figura 10 conecta el borne de salida con el de entrada de polaridad invertida. En el nodo A la corriente que entra al AO es prácticamente nula dado que, como se dijo, Z_e es idealmente infinita por lo que la I_2 es muy aproximadamente igual a I_1 .

Por otra parte cómo la ganancia es alta y V_s es relativamente baja, (unos 12 V limitada por la tensión de alimentación del AO), la diferencia de potencial entre A y B es pequeñísima, del orden de la fracción del micro voltio.

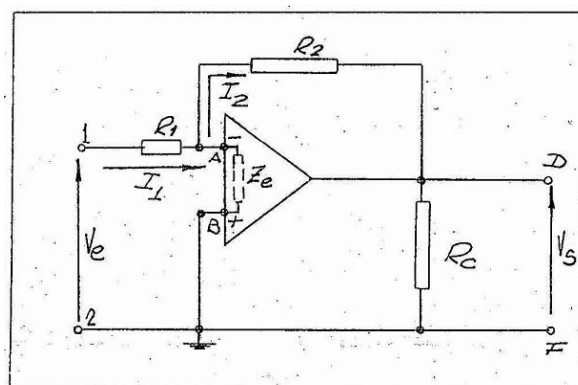


Figura 10

En otras palabras, los puntos A y B tienen el mismo potencial y la impedancia entre ellos es infinitamente grande. Se dice que la entrada invertida del AO tiene conexión de tierra virtual ya que su potencial es el mismo de B conectado a masa.

De lo que acabamos de decir se deduce que (en módulos):

$$\begin{aligned} I_1 \cdot R_1 &= V_e \\ I_2 \cdot R_2 &= I_1 \cdot R_2 = V_s \end{aligned}$$

De donde:

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

Se ve ahora que la ganancia del circuito y está fijada por la relación de resistencias, independientemente de las características del amplificador.

4.5.3 Amplificador Operacional Usado como Integrador:

Si en el circuito de la Figura 10 se reemplaza R_2 por un capacitor tal como mostramos en la Figura 11, el circuito actúa como un integrador. La tensión de salida V_s es, en todo momento la integral en el tiempo de la entrada V_e .

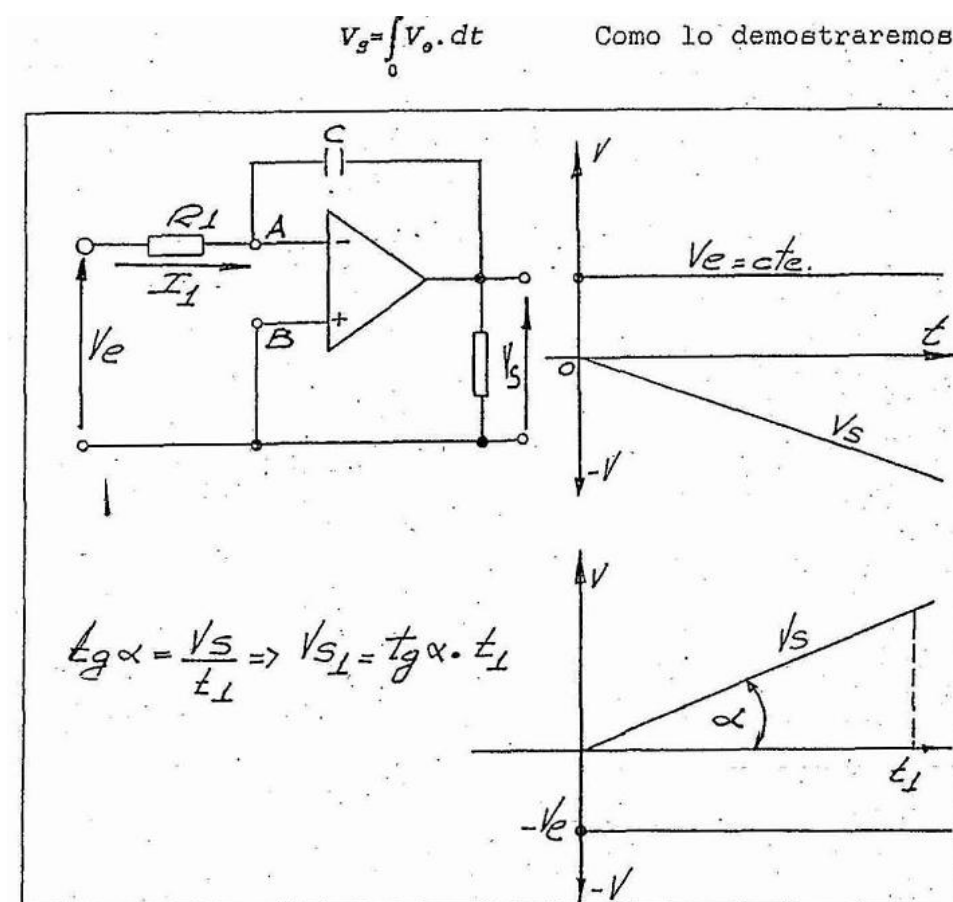


Figura 11

Supongamos que en el instante t_0 , el capacitor está completamente descargado, su diferencia de potencial $V_c=0$. Como se sabe la tensión V_e que por acción del AO es también igual a la salida V_s en el instante t .

$$V_c = V_s = \frac{1}{C} \cdot \int_0^t I_1 \cdot dt \quad \text{pero como : } I_1 = \frac{V_e}{R_1}$$

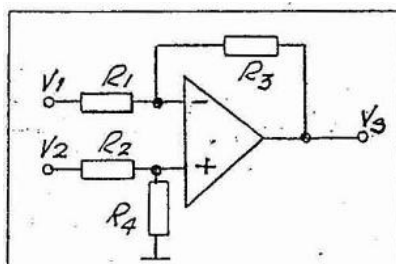
$$V_c = V_s = \frac{1}{C \cdot R_1} \cdot \int_0^t V_e \cdot dt.$$

La tensión de salida V_s es la integral de V_e siempre que C y R_1 sean constantes. En el caso particular de que V_e sea constante, V_s va creciendo linealmente, Figura 11b) y Figura 11c), (casos en que V_e sea positiva o negativa).

Por otra parte, como V_e y R_1 son constantes, I_1 también lo es. Es decir, el AO hace que el capacitor sea cargado a corriente constante.

4.5.4 Resumen de Circuitos con Amplificadores Empleados en Instrumentación

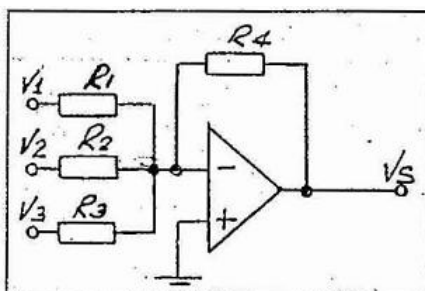
Circuito comparador:



Para $R_1=R_2$ y $R_3=R_4$

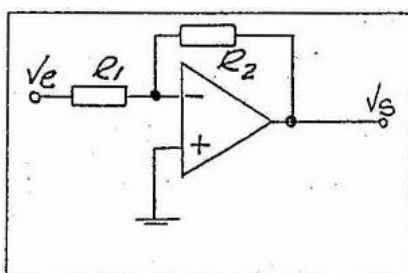
$$V_s = \frac{R_3}{R_1} \cdot (V_2 - V_1) \quad ; \quad G = \frac{R_3}{R_1}$$

Circuito sumador:



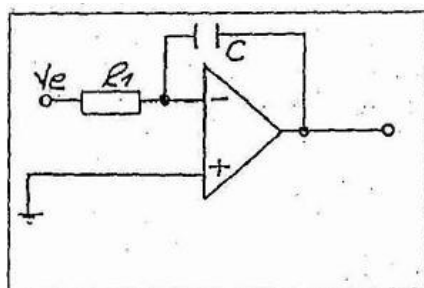
$$-V_s = \frac{R_4}{R_1} \cdot V_1 + \frac{R_4}{R_2} \cdot V_2 + \frac{R_4}{R_3} \cdot V_3$$

Circuito amplificador (inversor):



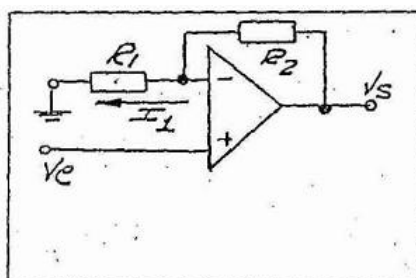
$$V_s = -\frac{R_2}{R_1} \quad ; \quad G = \frac{R_2}{R_1}$$

Circuito integrador:



$$V_s = -\frac{1}{R_1 \cdot C} \cdot \int_0^t V_e \cdot dt$$

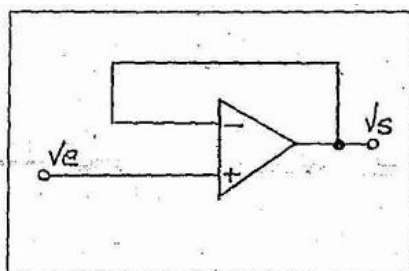
Circuito amplificador (no inversor):



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

$$G = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

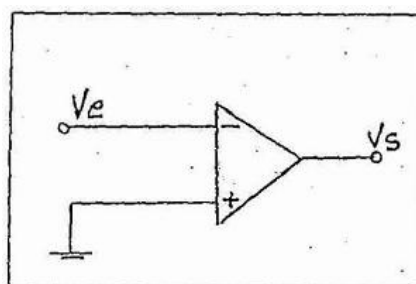
Seguidor con alta impedancia de entrada:



$$V_s = V_e$$

$$G = 1$$

Detector de cero:



5 Esquema Básico de un Instrumento Digital.

La función principal de un instrumento digital es transformar una señal analógica en su equivalente digital. Esta señal analógica puede ser una tensión continua, una tensión alterna; una corriente eléctrica de CC o CA una frecuencia, etc. El proceso para cumplir este objetivo se puede dividir en cuatro bloques funcionales como muestra la Figura 12.

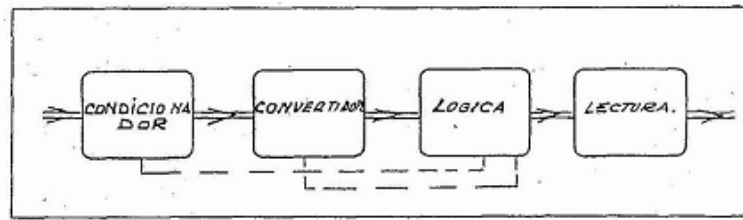


Figura 12

La señal de entrada debe pasar primero a través de un tipo de acondicionador. Si lo que se va a medir es una tensión de corriente continua, el acondicionador puede ser un atenuador para los rangos de tensión grandes y un amplificador para los rangos bajos. Si la señal de entrada es una tensión de corriente alterna, previamente se pasa a una forma equivalente (se rectifica a un valor promedio, se obtiene un valor rms o se retiene el pico).

Generando una corriente continua constante un convertidor de resistencia tensión permite transformar la señal de resistencia desconocida a una tensión de CC. Prácticamente en todos los casos el acondicionador transforma el parámetro desconocido a medir en una tensión que esté dentro del rango de operación del conversor analógico-digital.

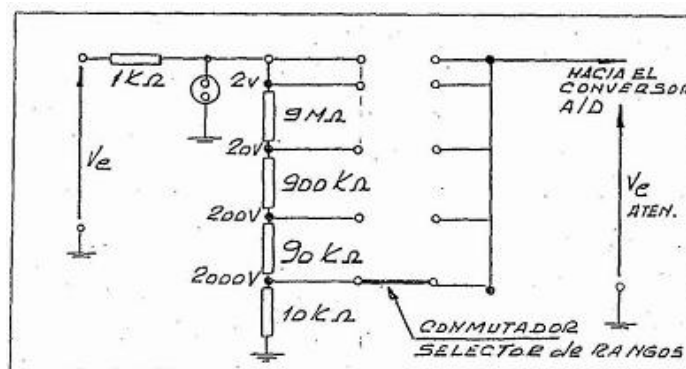
El trabajo o la función del conversor analógico-digital es tomar la tensión en CC preescalado por el acondicionador y transformarlo en dígitos. Los conversores analógicos digitales son dispositivos electrónicos de CC de un solo rango. Algunos admiten una señal máxima de 10 V. Otros solamente 2V. Por esta razón, el acondicionador de la señal de entrada debe atenuar las tensiones grandes y amplificar las pequeñas, para darle al instrumento la selección de rangos adecuada. Estos dos bloques gobiernan las características básicas de un instrumento digital, tales como número de dígitos, rango, sensibilidad, etc.

El tercer bloque (Lógica) se encarga de manejar el flujo de información en el tiempo adecuado para asegurar que las funciones internas se lleven a cabo en el orden correcto. Este bloque actúa como el comunicador con el exterior, la lógica maneja el flujo de salida de información digital y acepta instrucciones de programación de otros dispositivos. Finalmente la lectura comunica visualmente el resultado de una medida.

En resumen, los instrumentos digitales son esencialmente voltímetros digitales que se diseñan para medir voltajes de CD, también se pueden medir otras cantidades si se incluyen circuitos adicionales dentro del medidor que transformen esa cantidad en una tensión continua equivalente.

5.1 Ejemplos Comunes de Acondicionadores

5.1.1 Atenuador de Corriente Continua.



En el esquema anterior vemos un atenuador de corriente continua que puede presentar un instrumento digital a través de su acondicionador. Supongamos por ejemplo que la tensión de entrada sea de 1500 V de CC con el conmutador de rangos seleccionamos el rango de 2000V.

Como la impedancia de entrada del conversor analógico digital es infinita teóricamente, la corriente a través del divisor será:

$$I_e = \frac{U_e}{R_T} = \frac{1500V}{10,001 \times 10^6 \Omega} = 1,5 \cdot 10^{-4} A$$

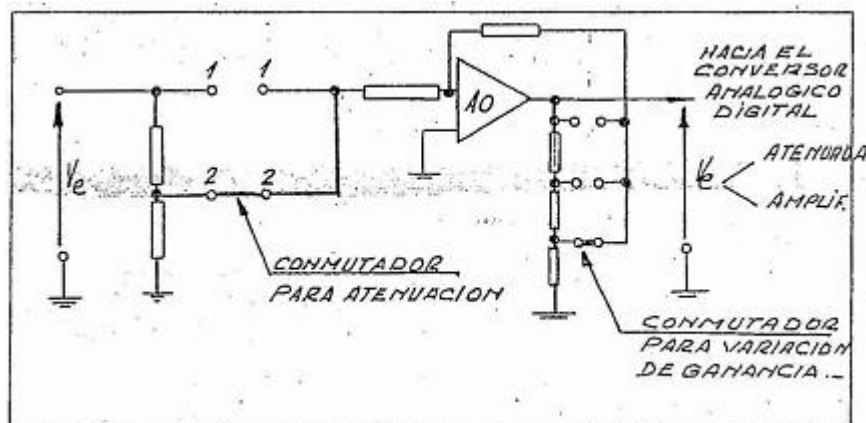
Luego la tensión de entrada atenuada que se aplica al conversor analógico-digital será:

$$U_{e \text{ atenuada}} = 1,5 \cdot 10^{-4} A \cdot 10 K\Omega = 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot 10 \cdot 10^3 \Omega = 1,5 V$$

Vemos que el valor máximo de tensión a la entrada del conversor analógico digital será de 2 V, que será la tensión atenuada para una tensión de entrada V_e .

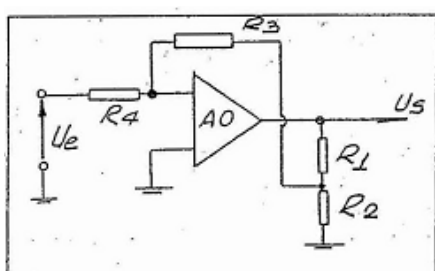
A la entrada del divisor de tensión se coloca un varistor que cumple la función de limitar tensiones excesivas, en este caso superior a 2000 V.

5.1.2 Atenuador de CC con Amplificador

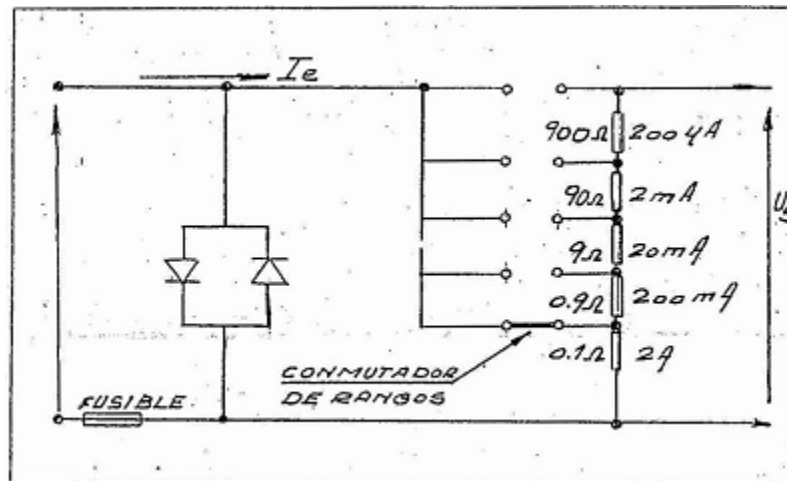


El esquema anterior corresponde a otro tipo de atenuador de cc. Vemos que los pasos de atenuación es menor que el caso anterior, (en este caso es solamente un paso). Generalmente la etapa de atenuación es 10.000: 1, y luego esa tensión atenuada se amplifica a través del AO de ganancia variable a través del conmutador electrónico para ese fin. Si la V_e es muy débil, del orden de los milivoltios, no se usa la atenuación de entrada y al contrario se amplifica en el AO y llevar así una tensión acorde al rango del conversor A/ D.

Nota: El esquema de conexión del AO corresponde a un amplificador de alta ganancia, siendo su valor:



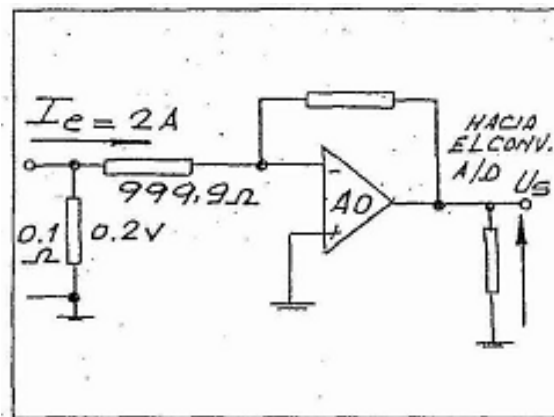
$$G = -\frac{R_3}{R_4} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)$$

5.1.3 Conversor de Corriente Tensión:

Con un circuito como el esquema anterior se puede "transformar" una corriente a medir en una tensión, como resultado de colocar una resistencia en serie. Como vemos en el dibujo, si el conmutador está en la posición indicada (rango 2 A) y circulara una corriente de 2 A en el circuito a medir, la caída de tensión en la resistencia sería

$$0,1\Omega \cdot 2A = 0,2V$$

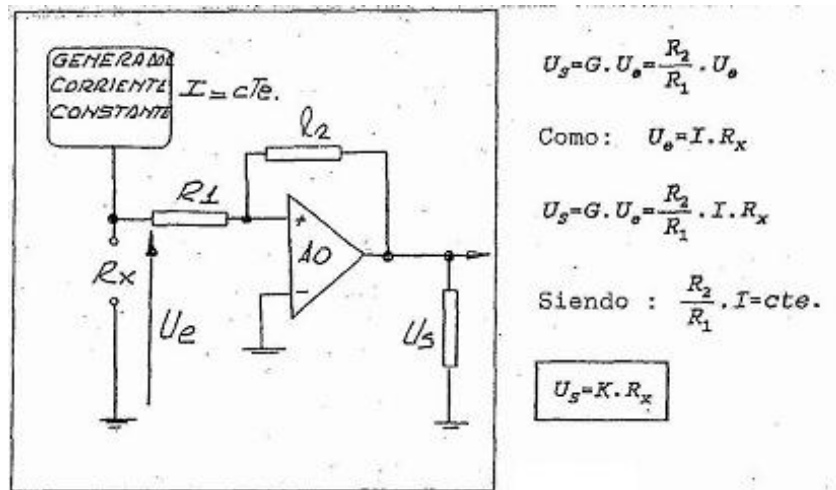
Luego la tensión aplicada al conversor analógico digital, será esa tensión que previamente es amplificada en un AO.



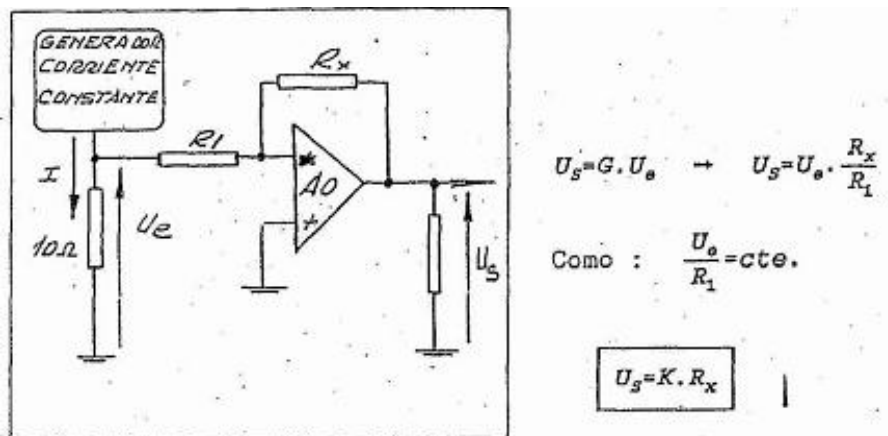
Dos diodos de protección son colocados en el circuito. Notemos que si la corriente a medir no supera los 2 A, la máxima caída de tensión en las resistencias no superará los 0,2 V. Los diodos se hacen conductores cuando entre sus extremos aparezcan aproximadamente 0,3 V que es la tensión de conducción. Es decir, si la corriente fuera de más de 2 A, en las resistencias shunts habría una tensión superior a 0,3 V y se produciría un cortocircuito en el diodo, (el diodo ahora conduce) quemándose el fusible que actúa como protección.

5.1.4 Conversor Resistencia Tensión

La resistencia es medida por el paso de una corriente constante a través de la resistencia desconocida R_x , y midiendo la caída de tensión a través de ella, ya que:



Otra forma de circuito podría ser como se muestra en Figura siguiente, donde Rx se coloca como resistencia en la rama de realimentación del AO.



6 Voltímetros Digitales

Los voltímetros digitales emplean convertidores A/D y contadores BCD para convertir las señales de voltaje de entrada a palabras digitales codificadas en binario que se emplean para activar los dispositivos digitales de despliegue.

Como las señales analógicas a los convertidores A/D deben ser de corriente directa (o con variación muy lenta), los voltajes de entrada que miden los voltímetros digitales deben ser ya sea voltajes de corriente directa o voltajes de corriente alterna pasados a una forma equivalente (valor promedio, rms o pico de cd).

Los voltímetros digitales más sencillos y menos costosos tienen la menor resolución (expresada como el número de dígitos en la pantalla) y emplean convertidores integradores de voltaje a frecuencia para efectuar sus conversiones digitales. El medidor de tablero común con pantalla digital de 3 ½ dígitos es el ejemplo principal de instrumento de bajo precio. Los modelos de voltímetros digitales algo más sofisticados están diseñados generalmente con convertidores A/D integradores de doble rampa. Esos convertidores, aunque relativamente lentos, puede dar una excelente resolución, alta resistencia al ruido y precio moderado. Para la mayoría de las aplicaciones puede considerarse como adecuado un convertidor A/D de doble rampa que realice de 15 a 30 conversiones por segundo. Los voltímetros para aplicaciones especiales, en los cuales se necesitan un gran número de lecturas por segundo, emplean convertidores A/D de aproximaciones sucesivas.

6.1 Tipos de Conversores Analógicos - Digitales más Utilizados

6.1.1 Voltímetro con conversor A/D de rampa o conversión tensión - tiempo.

Reduce el problema de medir una tensión al medir un tiempo que le es proporcional. Dicho tiempo se mide, según lo visto mediante un contador que recuenta los pulsos que procedentes de un oscilador patrón, pasan a través de una compuerta, que está abierta durante el tiempo que se desea medir.

El instrumento tiene un generador de rampa constituido por AO integrador a cuya entrada está conectada una fuente de tensión de referencia V_R . Siendo constante esta tensión de referencia V_R , la R_I del OA y la capacidad C (ver Figura) la característica tensión-tiempo de la salida del integrador es una recta de pendiente:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{V_R}{R_I \cdot C} = \text{cte}$$

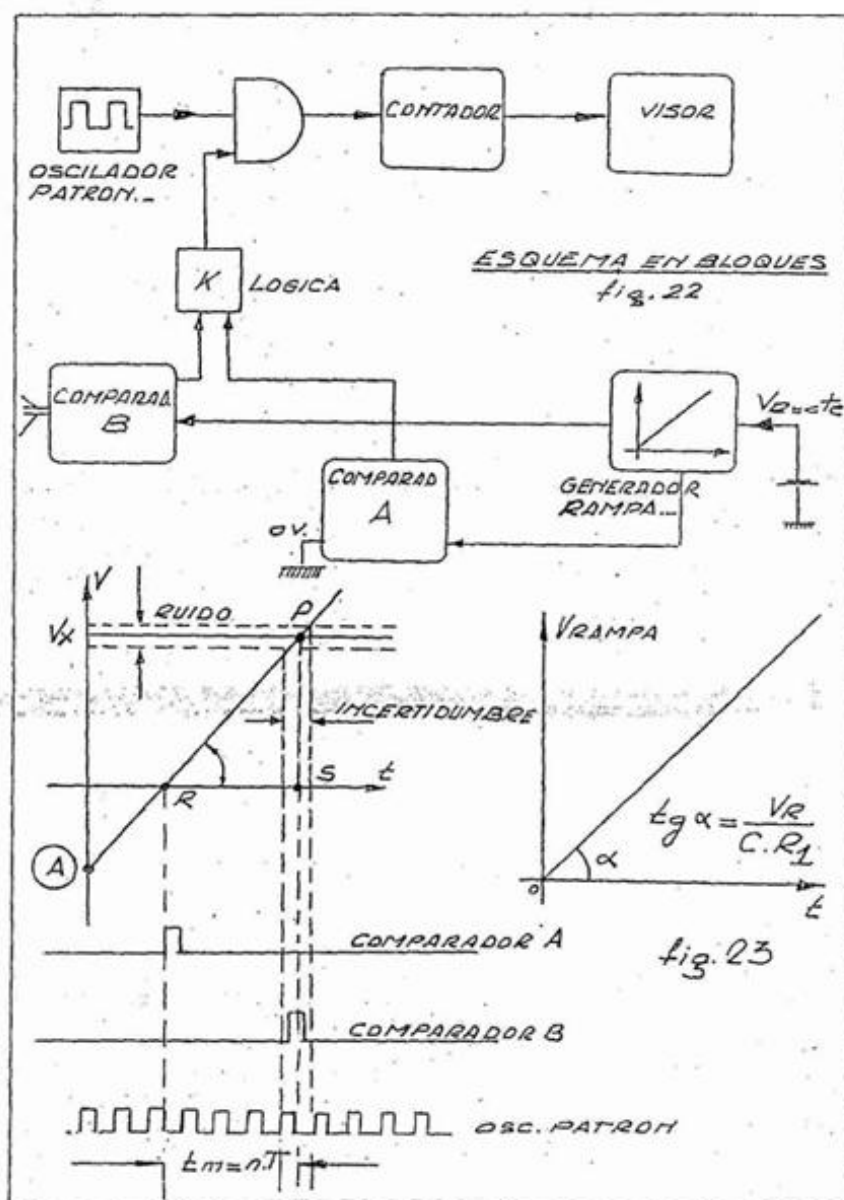


Figura 13: Conversor de rampa

Funcionamiento:

Cuando se conecta al instrumento la tensión incógnita V_x , el generador de rampa empieza a funcionar con una característica: $V_s=f(t)$ que comienza con un valor menor que cero, (punto A).

Las señales $V_s=f(t)$ son enviadas a dos comparadores de tensiones A y B simultáneamente que emitirán un pulso cuando se igualan las dos tensiones conectadas a sus entradas. Cuando la rampa pasa por cero volt, el comparador de tensiones A emite un pulso que permite que el bloque lógico K, tenga un "1" a la salida permanente, permitiendo que a través de la compuerta AND pasen los pulsos del oscilador al contador.

Cuando la tensión de rampa iguala a V_x , el comparador B emite un pulso que va a la lógica K, y hace cambiar el "1", anterior por un "0", lo cual hace que la compuerta AND tenga cero a su salida permanentemente, y termina el recuento de los pulsos del oscilador, cuyo número N es medida de V_x , ya que:

$$V_x = \overline{PS} = \overline{RS} \cdot \operatorname{tg} \alpha = n \cdot T \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

Siendo: T = período de los pulsos del oscilador patrón =cte.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{V_R}{C \cdot R_1} = \text{cte.}$$

$n = n^\circ$ de pulsos.

Luego:

$$V_x = K \cdot n$$

Causas de error:

- El error propio de la tensión de referencia
- Variaciones de la pendiente de la rampa por alteraciones del capacitor o de la resistencia R_1 , por temperatura o envejecimiento.
- El ruido de que pueda estar afectada la incógnita ya que su comparación con la tensión de rampa queda mal definida.
- Variación de la frecuencia del oscilador.

Son instrumentos baratos y de exactitud moderada, del orden de $\pm 0,05\%$ de la lectura.

6.1.2 Voltímetro digital con conversor A/D de doble rampa

Consiste en una modificación del instrumento anterior que elimina sus principales causas de error. La tensión incógnita V_x es llevada a la entrada de un AO integrador durante cierto tiempo constante " t_0 " que se mide contando determinado "no" de pulsos del oscilador patrón, digamos por ejemplo $n_0 = 10000$.

El sistema básico en bloques de este tipo de instrumento se muestra en la Figura 14

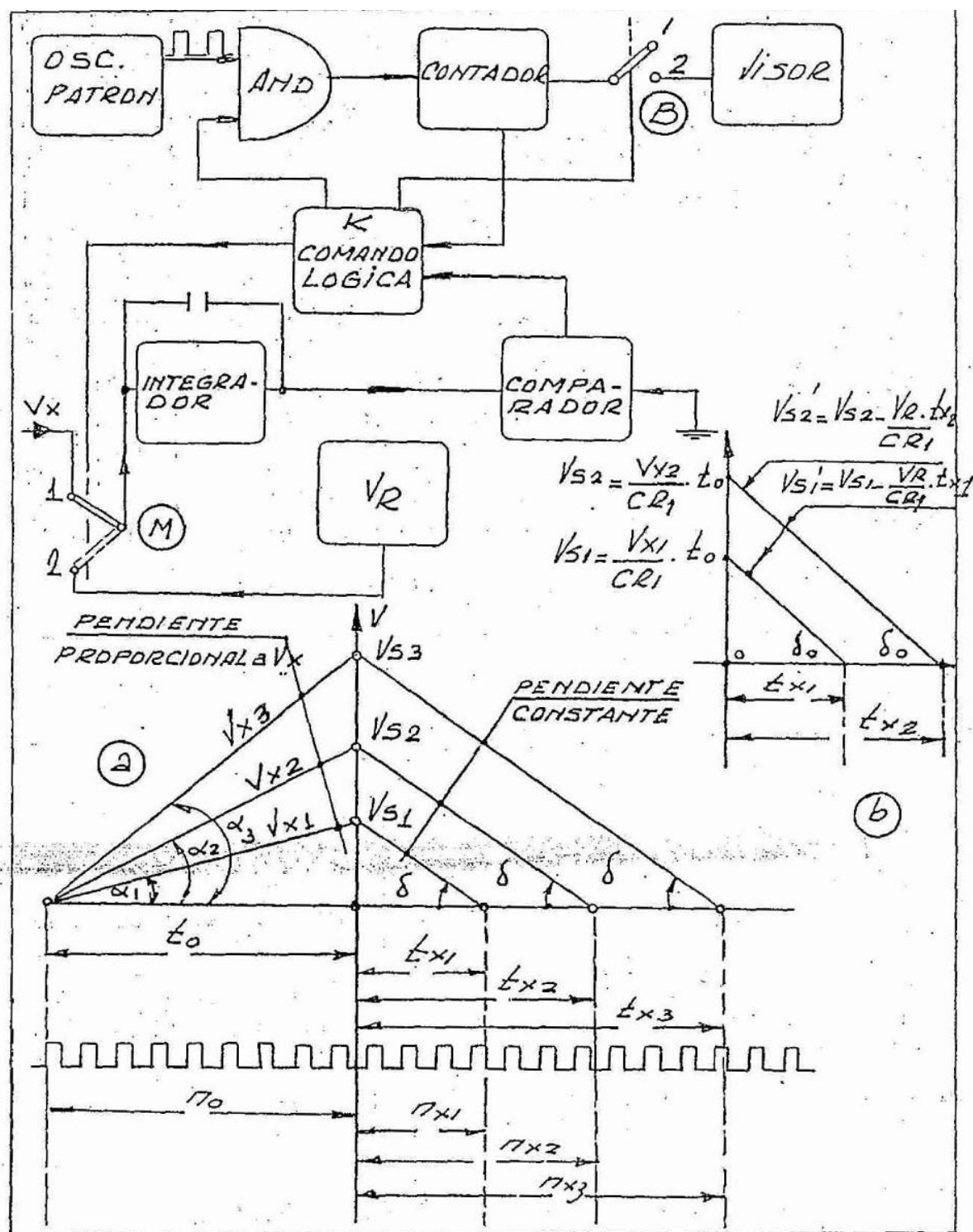


Figura 14: Conversor doble rampa

Funcionamiento:

Con el conmutador electrónico M en la posición 1, la tensión V_x a medir, que suponemos constante es llevado al AO integrador, y la salida de éste será una tensión V_s que va creciendo según una pendiente de valor:

$$tg. \alpha = \frac{V_x}{C \cdot R_1}$$

según, vimos anteriormente.

Como C y R_1 son constantes, las pendientes de crecimiento dependerá de V_x (en la Figura 14a), se visualizan tres pendientes distintas originadas por tres tensiones V_x distintas).

Al cabo de un cierto tiempo t_0 (que corresponde a n_0 = ciclos del oscilador) la salida del integrador será:

$$V_s = \frac{V_x}{C \cdot R_1} \cdot t_0 = tg. \alpha \cdot t_0 \quad (1)$$

Como $t_0 = cte.$, (valor fijado por el equipo), tendremos que $V_s = K \cdot V_x$ proporcional a la tensión de entrada.

Una vez cumplido el tiempo t_0 , automáticamente, mediante el conmutador M se desconecta V_x y se conecta a la entrada del integrador una tensión de referencia V_R que es siempre de polaridad inversa a V_x , por lo tanto la salida del integrador a partir del tiempo t_0 , será de pendiente decreciente (Figura 14b), dicha salida será ahora:

$$V'_s = V_s - \frac{V_R}{C \cdot R_1} \cdot t_x \quad (2) \quad \text{Siendo } -\frac{V_R}{C \cdot R_1} = tg. \delta = cte$$

Siendo:

V_s = Tensión de salida del integrador durante el tiempo t_0 .

V'_s = Tensión de salida del integrador durante el tiempo t_0 .

El tiempo t_x que la salida del integrador tarda en tener tensión de salida nula será:

$$\begin{aligned} \text{De la ecuación (2)} : 0 &= V_s - \frac{V_R}{C \cdot R_1} \cdot t_x \\ \rightarrow \frac{V_x}{C \cdot R_1} \cdot t_0 - \frac{V_R}{C \cdot R_1} \cdot t_x &= 0 \quad \rightarrow V_x \cdot t_0 = V_R \cdot t_x \\ \boxed{V_x = \frac{V_R}{t_0} \cdot t_x} & \quad (3) \end{aligned}$$

Ahora bien, los tiempos t_x y t_0 están dados por el mismo oscilador a través de ciertos números de pulsos n_x y n_0 respectivamente, de período T invariable en el pequeñísimo tiempo en que se cumple el proceso de la medición suma de t_0 y t_x , por lo que:

$$n_x = f \cdot t_x$$

$$n_0 = f \cdot t_0$$

Siendo $f \approx$ frecuencia del oscilador : $1/T$

De donde : $\frac{t_x}{t_0} = \frac{n_x}{n_0} \quad (4)$

Reemplazando (4) en (8)

$$V_x = \frac{n_x}{n_0} \cdot V_R \quad \text{como } V_R \text{ y } n_0 = \text{ctes.}$$

$$\boxed{V_x = K \cdot n_x} \quad (5)$$

Como se puede observar en la última expresión, el valor de V_x , o sea de la tensión a medir es proporcional al número de pulsos n_x , independiente de la frecuencia del reloj y de los valores de R_1 y C del AO integrador. Así por ejemplo si:

$$V_R = 1V \quad \text{y} \quad n_0 = 10.000 \text{ pulsos}$$

Para $V_x = 10V$, pasarían 100.000 pulsos al contador.

Respecto de los errores, la ecuación 5 nos muestra que influyen: V_R , n_0 y n_x . La mayor componente del error total sería la de la tensión de referencia, ya que no puede fijarse casi sin error y n_x estaría afectado del consabido error de ± 1 cifra.

El error de n_0 sería de fracción de período debido a imperfecciones del sistema de conmutación M , que le impiden actuar sin acierto retardo. Las causas b) y c) de error en el voltímetro de simple rampa no se producen en éste con lo que la exactitud de éstos de doble rampa es muy superior.

Veamos ahora el funcionamiento del instrumento en el diagrama de bloques: Mientras V_x se encuentra conectada a la entrada del AO integrador el comando K de la lógica envía un "0" a la entrada de la compuerta AND y su salida será "0" lógico.

Cuando transcurre el tiempo t_0 , el comando K conmuta a través de M la entrada V_x por V_R y simultáneamente envía un "1" a la entrada V_x por V_r y simultáneamente envía un "1" a la compuerta AND permitiendo el pasaje de pulsos del oscilador a través de ella.

Cuando la salida del integrador es cero, el comparador de tensiones (detector de cero) envía un pulso al comando, y este vuelve a nivel "0" no permitiendo la apertura de la compuerta AND. Pasarán al contador " n_x " pulsos en t_x tiempo. El contador a través del decodificador indica en el visor la tensión V_x .

6.1.3 Voltímetro con conversor A/D de modulación de pulsos delta

La tensión incógnita V_x es medida calculando el valor V_c que tiene la tensión en los bornes de un capacitor, a la que se iguala mediante un proceso de cargas y descargas del capacitor, Figura 15. La V_c es así mantenida dentro de valores por encima y por debajo de V_x que solo difieren en una fracción de μV .

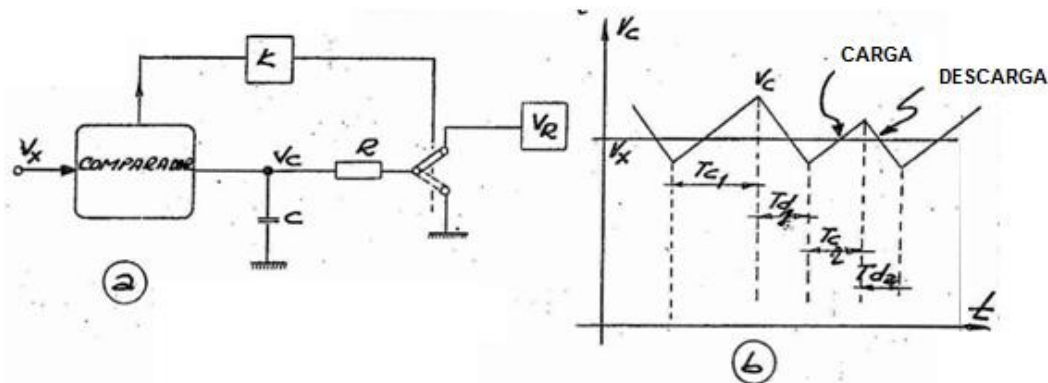


Figura 15: Conversor modulación pulsos delta

Funcionamiento:

Para lograr que V_c sea aproximadamente igual a V_x alternativamente se lo carga (con una fuente de tensión de referencia) y se lo descarga poniéndolo a masa, completando un número n_0 de ciclos de carga y descarga que depende, como veremos, del valor de la incógnita y que en el ejemplo que haremos varía entre 400 y 2000.

El cálculo de V_c y por lo tanto de V_x se hace según este razonamiento: Si **V_c se mantiene aproximadamente constante** a través de los ciclos de carga y descarga se debe a que la cantidad Q_c de electricidad entregada al capacitor al cabo de los N_c (ciclos de carga) es sensiblemente igual a Q_d (cantidad de electricidad en la descarga) que éste devuelve en los N_d (ciclos de descarga). Si Q_c y Q_d no fuesen iguales el capacitor hubiese ganado o perdido carga y habría modificado su tensión.

Para calcular la Q tengamos en cuenta que la intensidad de carga es:

$$\text{Intensidad de carga: } I_c = \frac{V_R - V_c}{R} \quad (1)$$

y **se mantiene constante** en el tiempo de carga T_c , ya que V_c también, (V_c solo varia en fracciones de μV). De allí la linealidad de los pequeños tramos de las características de carga y descarga dibujado en la Figura 15b).

También tendremos que:

$$\text{Intensidad de descarga: } I_d = \frac{V_c}{R} \quad (2)$$

que también se **mantiene constante** durante el tiempo T_d .

Se elige la tensión de referencia V_R de modo que sea por lo menos el doble que el alcance del instrumento es decir:

$$V_R \geq 2 \cdot V_{x_{máxima}}$$

Esto tiene como consecuencia que la tensión de carga, que es:

$$\text{Tensión de carga: } V_R - V_X$$

sea mayor que la de descarga:

$$\text{Tensión de descarga: } V_C = V_X$$

Por ello: $I_c > I_d$, y por lo tanto la pendiente de la característica de carga es mayor que la descarga y, por lo tanto, el tiempo de carga siempre es de un periodo T_0 del reloj.

La Q_c es:

$$Q_c = I_c \cdot (T_{c_1} + T_{c_2} + T_{c_3} + \dots + T_{c_i} + \dots + T_{c_n}) =$$

$$= I_c \cdot \sum_{i=1}^n T_{c_i} = I_c \cdot T_c = T_c \cdot \frac{V_R - V_C}{R}$$

$$Q_c = T_c \cdot \frac{V_R - V_C}{R}$$

De la misma manera, haciendo:

$$T_d = \sum_{i=1}^n T_{d_i} = T_{d_f}$$

Pero si T es el tiempo total:

$$T_d = T - T_c$$

De acuerdo a lo dicho:

$$Q_c = Q_d \cdot T_c \cdot \frac{V_R - V_C}{R} = \frac{V_C}{R} \cdot (T - T_c)$$

Desarrollando:

$$\frac{T_c \cdot V_R}{R} - \frac{T_c \cdot V_C}{R} = \frac{V_C \cdot T}{R} - \frac{V_C \cdot T_c}{R}$$

$$T_c \cdot V_R = V_C \cdot T$$

$$(2) \quad V_C = V_X = \frac{T_c}{T} \cdot V_R$$

El problema que falta resolver es el de medir las sumas de los tiempos del total de los ciclos de carga y la de los de descarga. Para ello, en primer lugar se hace que los ciclos, tanto de carga como descarga, **duren un número entero de periodos T_0 de un oscilador patrón o reloj.**

El diagrama de la Figura 15 se completa como se muestra en la Figura 16 de modo que pueda contarse el número total de periodos T_c en que se cargó y el número total de periodos T_0 que se cumplieron entre ciclos de carga y descarga, que en el ejemplo es de 4000.

Evidentemente, la relación es la de los tiempos, por lo tanto la ecuación (2) queda:

(3)

$$V_C = V_X = \frac{N_C}{N} \cdot V_R$$

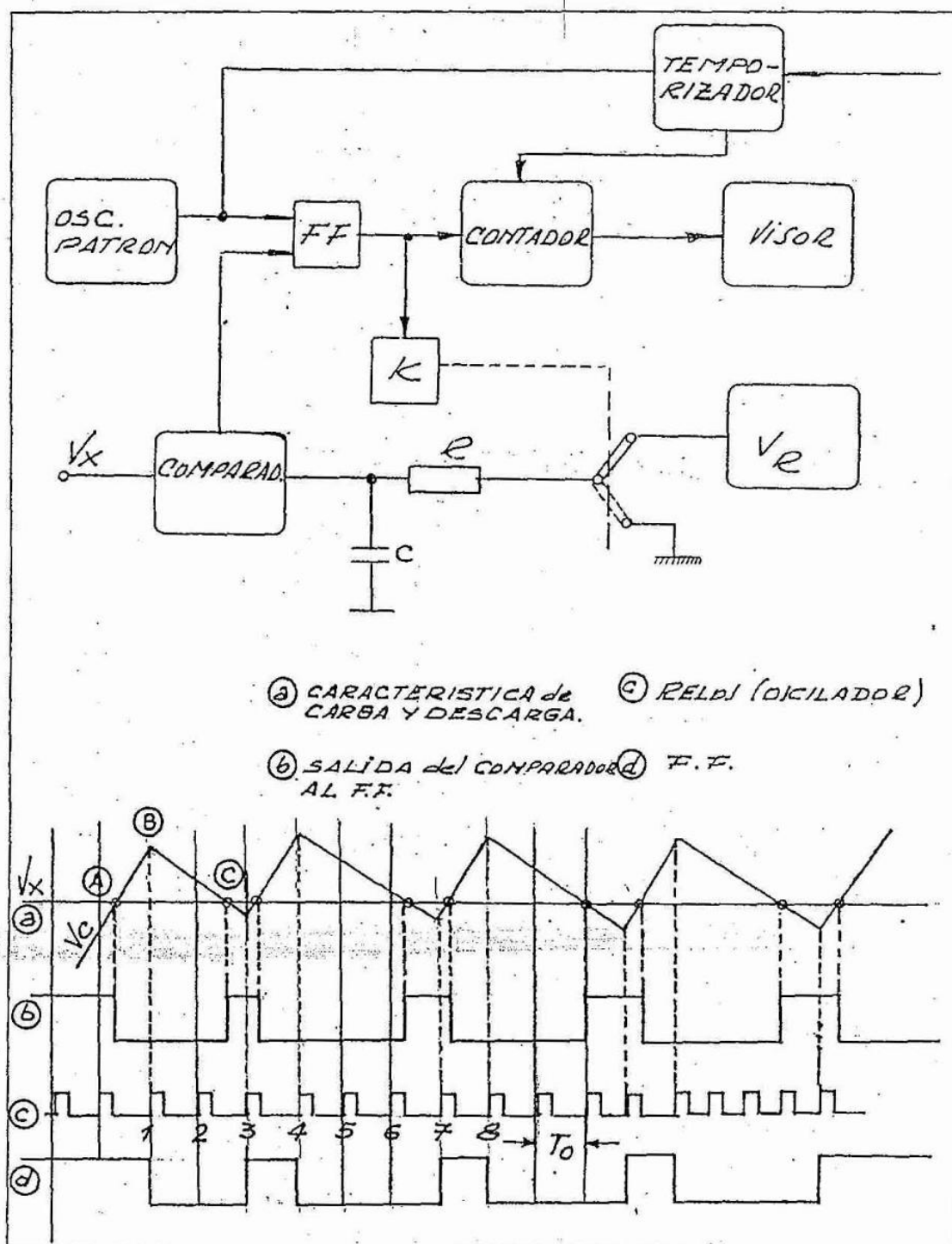


Figura 16

Para entender el funcionamiento veamos en la Figura 16, la curva característica de cargas y descargas. Cuando se inicia el proceso de medición el capacitor se va cargando hasta que $V_c = V_x$, punto A. En ese momento el comparador de la Figura 16a) detecta la igualdad, por lo tanto su salida cambia de estado de "1" al "0", Figura 16b). Esta señal que entra al flip flop FF no lo cambia de estado hasta que no llegue a él el pulso "1" del oscilador (reloj), Figura 16c).

En la característica esto corresponde al punto B. Este cero "0" de salida del FF hace desactivar el comando K (conmutador electrónico), sale de servicio V_R y el capacitor se empieza a descargar contra tierra o masa.

Comienza la descarga y se vuelven a igualar V_c y V_x en el punto C, la salida del comparador pasa de "0" a "1", y al próximo pulso del reloj, (el número 3), se acciona el FF y éste al comando K del conmutador que comienza una nueva carga que dura hasta el pulso 4 y así siguiendo.

Adviértase que mientras el capacitor está en carga, el FF está en "1" y cuando se descarga, el FF en "0". Además, el contador no cuenta pulsos del oscilador, el FF pasó al estado "1", es decir, las veces que el capacitor estuvo en carga.

La gráfica de estados del FF, Figura 16, muestra que mientras el tiempo de carga es siempre de un período T_0 de pulso del oscilador, el de descarga es variable, tanto mayor cuanto menor es V_x .

El diagrama de bloques de la Figura 16 permite ver que el temporizador al recibir la orden de comenzar el proceso de la medición, pone al contador en condiciones de cero para que inicie el recuento de 4000 pulsos del oscilador patrón. Cumplidos éstos, el mismo temporizador detiene la marcha del contador que mostrará en el visor en cuántos de esos períodos el capacitor estuvo en carga. La señal del oscilador patrón se aplica también al FF, afín de obtener la sincronización de su salida como hemos visto, para que los ciclos de carga y descarga del capacitor duren un número entero de periodos del reloj.

Se ve, por otra parte, que para cada estado del FF el comando K determina la correspondiente posición del conmutador.

Para lograr que el número de ciclos de carga sea una medida de la tensión basta hacer en la ecuación (3), que, V_R sea, por ejemplo 4 V.

$$V_x = N_c \cdot \frac{4}{4.000} = 0,001 \cdot N_c$$

El número N_c que aparece en el visor da directamente en mV el valor de la incógnita.

La ecuación (3) pone en evidencia la causa de la alta exactitud de éste tipo de voltímetro, la única fuente de error es la tensión de referencia, como el de doble rampa, ya que aumentando convenientemente el número de cifras, el error de N_c y, por lo tanto de su relación, puede hacerse despreciable.

6.1.4 Voltímetro de conversión A/D por tensión - frecuencia

Convierte la tensión que se desea medir en una frecuencia que le es proporcional.

Funcionamiento:

Al aplicarse V_x a la entrada de un AO integrador, Figura 17a), a la salida aparece una tensión que como sabemos, es la integral de V_x en el tiempo. Ya vimos, entonces, que la variación de V_s es lineal. El comparador de tensiones emite en el instante en que V_s alcanza a igualar a la tensión de referencia V_R , un pulso que va la compuerta AND, y de ahí al contador, y otro que va al comando de un interruptor que, poniendo al capacitor en cortocircuito lo descarga instantáneamente, con lo que recomienza el ciclo.

La Figura 17b) permite visualizar la variación de V_s en forma de diente de sierra. “T” representa el tiempo que la compuerta AND está abierta, tiempo que es controlado por el oscilador patrón.

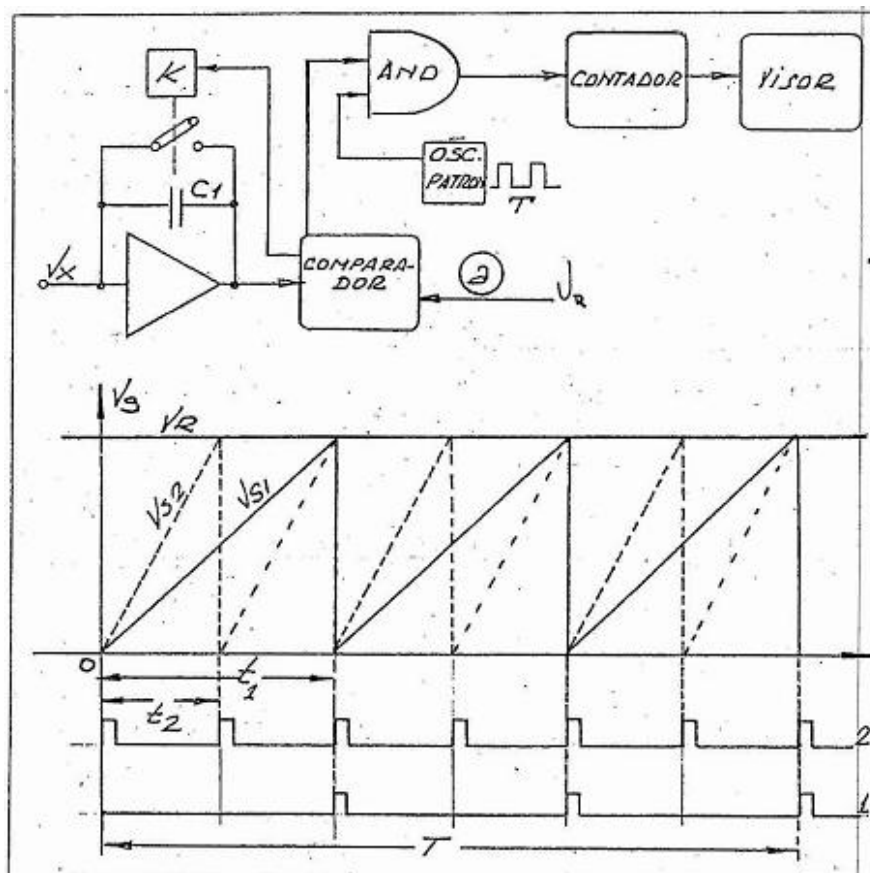


Figura 17: Conversor tensión - frecuencia

En línea de trazos se ha dibujado la característica correspondiente a una V_x doble que la anterior; la pendiente dada por $V_x/R.C1$ se duplica y en consecuencia, la frecuencia de los pulsos también.

Como ya vimos, al explicar el AO integrador, la tensión de salida es:

$$V_s = \frac{1}{R \cdot C} \cdot \int_0^t V_x \cdot dt$$

Para determinado valor de V_x el tiempo t_1 que tarda V_s en igualar a la tensión de referencia V_R está dado por:

$$V_s = V_R = \frac{V_x}{R \cdot C} \cdot t_1 \rightarrow t_1 = \frac{V_R \cdot R \cdot C}{V_x}$$

t_1 es el periodo de los pulsos llegados a la compuerta. Si ésta abierta el tiempo T, el número de pulsos que llega al visor es:

$$N = \frac{T}{t_1} = \frac{T}{R \cdot C \cdot V_R} \cdot V_x$$

Para que N sea una medida de V_x se hace por ejemplo:

$$\frac{T}{R \cdot C \cdot V_R} = 1000$$

Con lo que

$$N = 1000 V_x$$

el visor indica V_x en mV.

Si la tensión que debe medirse, V_x , varía un poco alrededor de determinado valor mientras la compuerta está abierta, cada uno de los dientes de sierra tiene pendiente algo diferente y en consecuencia los t_1 también difieren.

Debido a que la descarga brusca del capacitor en cortocircuito introduce algunos problemas, se prefiere usar un generador de pulsos que aplica a la entrada del AO un pulso de amplitud y duración tales que restablece la tensión de salida del AO a su nivel cero en un tiempo muy breve.

La exactitud de este tipo de voltímetro depende de la linealidad del convertidor y de la exactitud del oscilador que da la base de tiempo.

6.1.5 Voltímetro de conversión A/D por aproximaciones sucesivas

Es una técnica de conversión más efectiva que las anteriores. Se utiliza ampliamente debido a su combinación de alta resolución y velocidad.

En lugar que el voltaje que llega a un comparador sea una rampa que pasa por todos valores posibles hasta alcanzar V_x , la lógica de este convertidor es probar varios códigos de salida y compararlos con V_x hasta encontrar el valor que más se aproxime a esta V_x . El esquema de la Figura 18 muestra este convertidor. Utiliza un Registro (SAR), con convertidor Digital a Analógico (D/A) y un comparador.

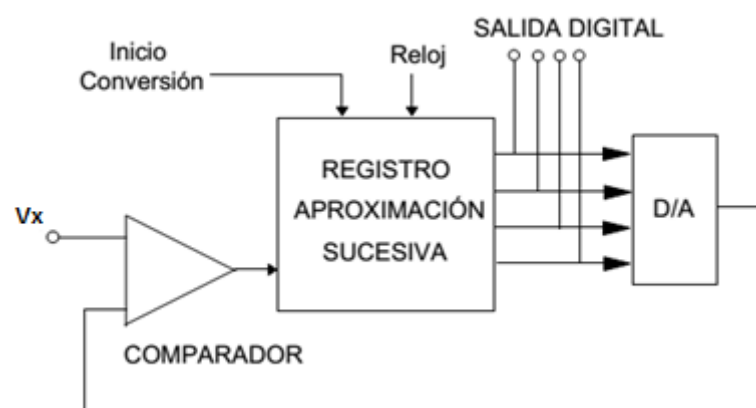


Figura 18: Convertidor de aproximaciones sucesivas

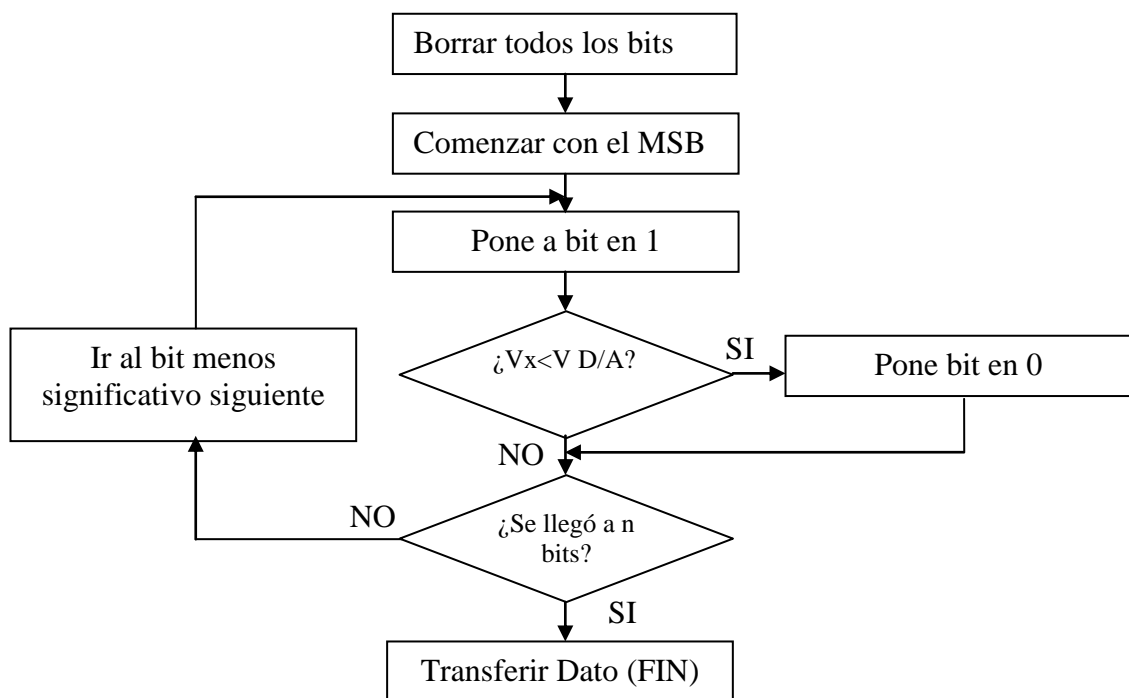
Funcionamiento:

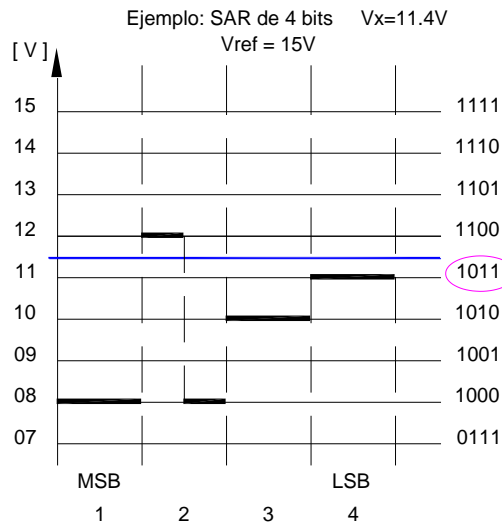
El registro SAR pone el bit más significativo (MSB) en "1" y todos los restantes en "0". Esa cantidad es tomada por un convertor de digital a analógico (D/A) de tal manera que su equivalente analógico se compara con la señal de entrada V_x .

El comparador llega a una decisión acerca de si almacenar en "1" en el MSB (cosa que ocurre si la salida del D/A es menor que la entrada) o si almacenar un "0" (cosa que ocurre si la salida del D/A resulta mayor que la entrada), quedando el estado del MSB definido luego de esta comparación.

A continuación, el segundo bit del convertidor se lleva a "1" y se hace una segunda comparación para definir si ahora este segundo bit se deja en "1" o se lo vuelve a "0".

Después de "n" comparaciones (n bits almacenados en el registro), el registro de almacenamiento contiene todos aquellos bits que se almacenaron como "1" y todos aquellos bits que se almacenaron como "0", y el contenido total será una aproximación digital del voltaje de la señal analógica de entrada. La Figura 19 muestra la salida característica de este tipo de convertor.





Descripción del ejemplo:

1. Pone a 1 el bit más significativo (bit 1) y lo deja en 1 porque $V_x > 8V$ (1000_2).
2. Pone a 1 el bit siguiente al MSB (bit 2) pero ahora $V_x < (8+4)V$ (1100_2) por lo que lo vuelve a 0.
3. Pone a 1 el bit siguiente (bit 3) y lo deja en 1 porque $V_x > (8+2)V$ (1010_2).
4. Pone a 1 el bit siguiente (bit 4) y lo deja en 1 porque $V_x > (8+2+1)V$ (1011_2).
5. Puesto que no hay más bit para comparar el resultado es 1011_2 o sea $11V$.

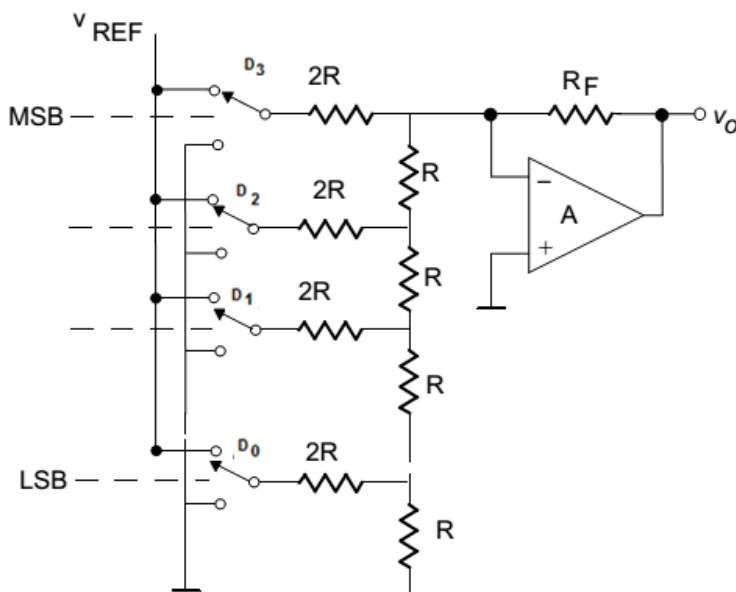
Figura 19: Conversión de aproximaciones sucesivas

El conversor de aproximaciones sucesivas es de los más utilizados, es posible encontrar modelos capaces de suministrar 16 bits en la salida y realizar la conversión en un tiempo de unas decenas de microsegundos. Los modelos de 12 y 8 bits, son los más comunes y ofrecen una elevada velocidad a un precio ajustado.

Como puede verse, el conversor de aproximaciones sucesivas utiliza un conversor digital a analógico (D/A). Uno de los D/A más comunes es el de “escalera R-2” que consiste en un amplificador operacional sumador junto a una red de resistencias de valor R y 2R.

Un D/A de 4 bits se esquematiza en la siguiente Figura.

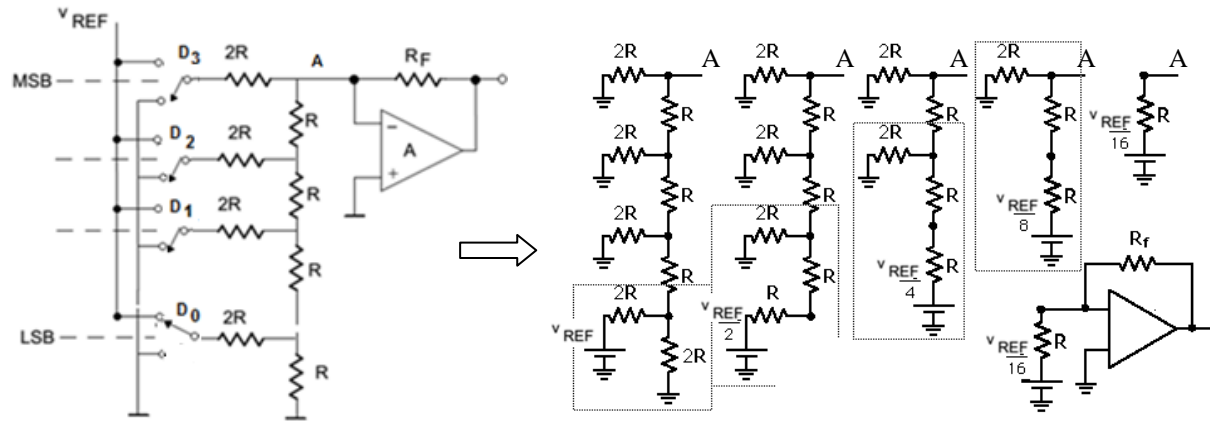
$$V_0 = -\frac{R_F}{R} V_{REF} \left[\frac{D_0}{16} + \frac{D_1}{8} + \frac{D_2}{4} + \frac{D_3}{2} \right]$$



Siendo D_0, D_1, D_2 y D_3 valores “0” o “1” que corresponde con la representación digital cuya forma analógica se quiere obtener.

Este circuito se puede analizar usando el Teorema de Superposición. Esto se hace suponiendo que la tensión de entrada (V_{REF}) solo se aplica a una entrada D (por ejemplo D_0) y todas las demás entradas (D_1 a D_3) están en cero. Entonces se determina la tensión de salida V_0 cuando se aplica por ejemplo D_0 . Por último, se suman todas las salidas para obtener la salida total.

Por ejemplo analicemos D_0 en “1” y todas las demás en “0”. Aplicando el teorema de Thevenin en el punto “A” sucesivas veces se tiene:



De manera similar analizando D_1 en "1" y todas las demás en "0", luego D_2 en "1" y todas las demás en "0", finalmente D_3 en "1" y todas las demás en "0" se llega a la expresión final del convertor D/A.

7 Frecuencímetros Digitales

El instrumento mide la frecuencia incógnita contando la cantidad de ciclos que se cumplen por la unidad de tiempo.

El circuito de entrada transforma en pulsos de adecuada amplitud la onda cuya frecuencia quiere medirse. Estos pulsos llegan al contador a través de una compuerta. El tiempo que la compuerta está abierta está fijado por un oscilador patrón, que forma parte del instrumento y que emite pulsos con $f_0 = 1 \text{ MHz}$ (a veces 10 MHz), controlada por un cristal de cuarzo. La exactitud y permanencia de éste valor es fundamental, como es fácil comprender.

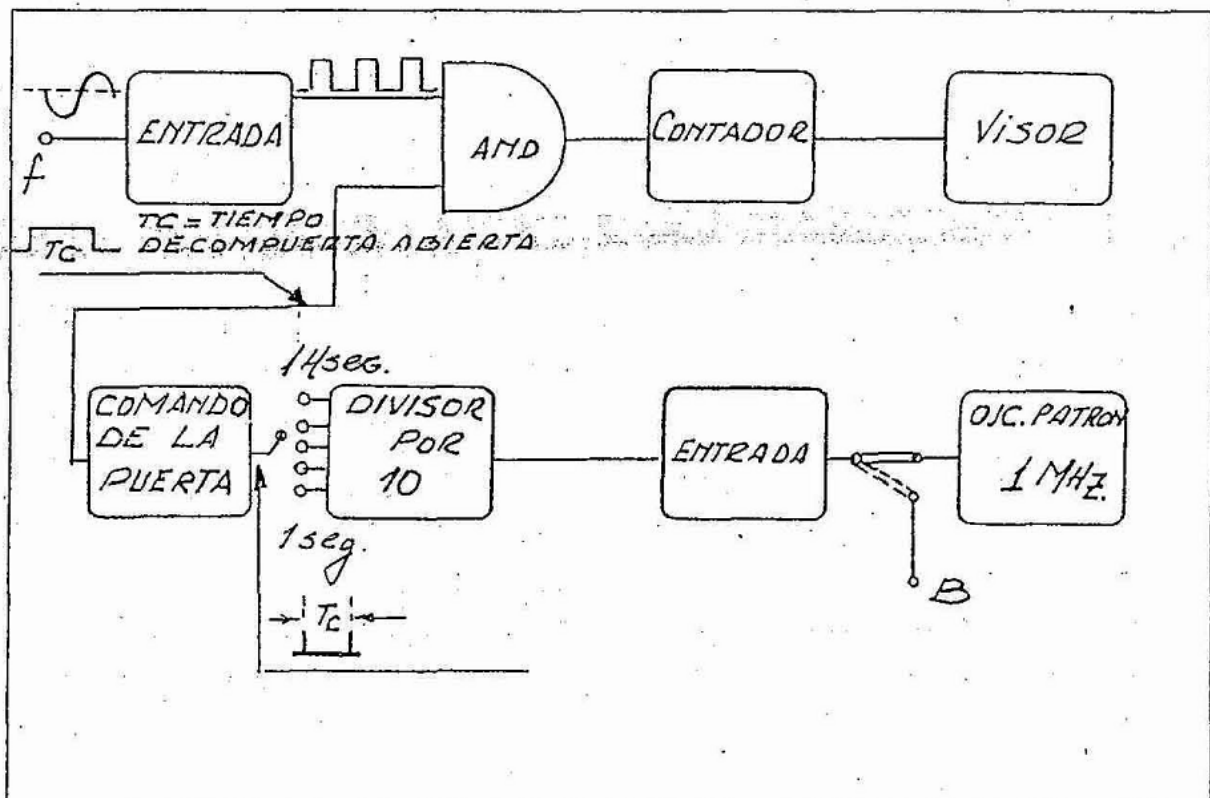


Figura 20: Esquema de un frecuencímetro digital

El comando de la compuerta, al primer pulso que recibe del oscilador abre la compuerta. Así, si el oscilador es de 1 MHz, la compuerta permanece abierta durante un 1 μ seg, tiempo determinado con la exactitud generalmente muy alta del oscilador. Al comando de la compuerta se interpone un divisor de frecuencia que a su salida dispone de frecuencias que respecto a la constante del oscilador están en relación: 1/1; 1/10; 1/100. Esto significa que a voluntad, puede mantenerse abierta la compuerta durante 1, 10, 100 mseg y 1 seg (a veces 10 seg). A éste tiempo de apertura se lo llama base de tiempo o tiempo base.

Para aclarar el funcionamiento del frecuencímetro supongamos que se trata de un instrumento de 7 dígitos, que la frecuencia que debe medirse es de: 2.579.235 Hz y que la base de tiempo sea variable de 1 μ seg a 1 seg.

En el cuadro que sigue, se muestra la lectura en el visor, correspondiente siempre a la misma frecuencia, si se varía la base de tiempo, lo que se logra accionando el selector de que el frecuencímetro está provisto.

BASE DE TIEMPO	VISOR	UNIDAD
1 seg	2 5 7 9 2 3 5	Hz
100 mseg	2 5 7 9, 2 3	KHz
10 mseg	2 5 7 9, 2	KHz
1 mseg	2 5 7 9	KHz
100 μ seg	2, 5 7	MHz
10 μ seg	2, 5	MHz
1 μ seg	2	MHz

Si la base de tiempo es de 1 segundo, la compuerta está abierta durante ese tiempo y al contador pasan 2579235 pulsos que quedan registrados en el visor en el que aparece automáticamente la leyenda "Hz" que es la unidad que corresponde.

Si cambiamos la base a 1 mseg, al haberse reducido a una milésima parte el tiempo de apertura, solo entrarán al visor 2.579 pulsos, cifra que corresponde a la frecuencia si se la expresa en kilociclos y en el visor aparece la leyenda "kHz", y así sucesivamente.

Se habrá notado que una juiciosa elección de la base de tiempo permite obtener la mejor resolución, que en el cuadro corresponde a 1 seg, la primera línea, la resolución es de 1 Hz. Adviértase la absurdamente baja resolución de la última línea que es de 1 MHz.

Nota: Recordemos de Medidas Eléctricas I, que resolución de un instrumento es el mínimo incremento de la cantidad medida que es capaz de detectar. Obviamente en el caso del instrumento digital ella está dada por la unidad de la primera cifra de la derecha. En inglés se la identifica por la sigla "LSD" formada por las iniciales de "Least Significant Digit", cuya traducción castellana es "dígito menos significativo".

El accionamiento del frecuencímetro digital puede hacerse manualmente o automáticamente. En éste último caso el instrumento repite periódicamente la medición, pudiéndose preestablecerse el ritmo, desde una fracción de segundo hasta varios segundos entre mediciones.

7.1 Error de ± 1 cifra:

La medición de frecuencias bajas presenta dificultades que se deben a lo que se llama error de ± 1 cifra. Supongamos que en el frecuencímetro que recién hemos descrito se quisiera medir una frecuencia de algo más que 6 Hz. La base de tiempo es más favorable que sea lo mayor posible (en el ejemplo del caso anterior sería 1 segundo), pues permite entrar la mayor cantidad de pulsos. Esta cantidad no queda bien definida como vamos a ver:

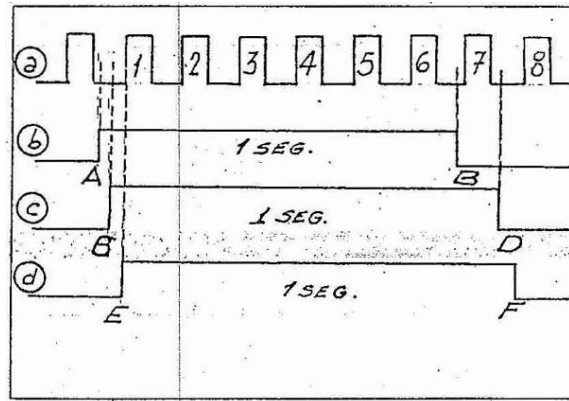


Figura 21

En la Figura 21 se muestran los pulsos de la frecuencia incógnita que llegan a la compuerta. En (a) y (c) se ha graficado la apertura de ésta de un segundo de duración en ambos casos, pero con comienzo en distintos instantes. Tengamos en cuenta en primer lugar que si decimos que la frecuencia es de por ejemplo 6,4 Hz, eso significa que en el gráfico la longitud AB (o CD) que representa el tiempo de 1 segundo en que la compuerta está abierta, es igual a 6,4 periodos de los pulsos de (a).

Es fácil entender entonces, que si la apertura se produce según (b), en el instante A, por la compuerta pasan 6 pulsos, y esto es lo que indica el visor, mientras que si se abre en C, el séptimo también entra y el visor indicará ahora 7 pulsos.

En general digamos que el valor verdadero de la frecuencia es $f = 6 + n$ donde $n < 1$ es la fracción aludida. Se ve, que cualquiera sea n , el valor medido puede ser 6 o 7. Se pueden dar dos soluciones:

- Si $n \approx 0$ (el valor verdadero $V_v \sim 6$ Hz). Si el valor medido es igual a 6 Hz, el error es pequeño, pero si el valor medido es 7 Hz, el error absoluto será $E = +1$ Hz.
- Si $n \approx 1$ (es decir el valor verdadero $V_v \sim 7$ Hz), el error será en el caso de la lectura: $V_m = 6$ Hz, $E = -1$ Hz

En otras palabras, dada una lectura cualquiera del visor, existe una incertidumbre de, ± 1 , cifra, aún suponiendo no haya ninguna otra fuente de error.

Puede reducirse la incertidumbre sincronizando la apertura de la compuerta con un pulso, el 1 por ejemplo, como se hace en algunos instrumentos. El pulso 1 pasa por la compuerta, así como los 5 que le siguen dando lectura 6. Es decir: $V_m = 6$ Hz.

Si en la expresión del valor verdadero: $n \approx 0$, es $E \approx 0$. Si $n \approx 1$, es $E \approx -1$ Hz.

Para expresar el error en el caso de compuerta sincronizada podemos escribir:

$$E = {}^{+0}_{-1}$$

En definitiva, todo instrumento digital, agrega a los errores originados en otras fuentes, el error de una cifra, la LSD. Es evidente que su influencia en el resultado depende del valor medido. Así en el ejemplo visto, 1 cifra representa un error inadmisibles, mientras que si el valor medido, en lugar de ser 6 Hz hubiese sido de 1000 Hz, el error se habría reducido $\pm 0,1\%$.

7.2 Errores del Frecuencímetro Digital

Se ha visto ya que el frecuencímetro funciona como tal midiendo el número de pulsos que pasan por la compuerta durante un tiempo que debe estar bien definido. El error en el valor de la frecuencia tiene entonces dos componentes: la del recuento de pulsos y la determinación del tiempo.

En cuanto a la primera hemos visto ya que si todo funciona correctamente, el único error es el de ± 1 cifra. Ya se vio el criterio para disminuir su influencia. En general el frecuencímetro tiene dispositivos que permiten verificar el correcto funcionamiento de sus partes críticas, tales como: compuerta, divisor decimal del tiempo, visor, etc.

Se sabe que la frecuencia del oscilador de cuarzo varía con la temperatura en forma parabólica. En los frecuencímetros de mayor exactitud el cristal está encerrado en una pequeña cámara termostatzada. De ésta manera se logra estabilidad del orden de $10^{-10}/^{\circ}\text{C}$.

El envejecimiento del cuarzo, es decir la influencia del tiempo, depende fundamentalmente del tipo de cristal, de su edad, y de las condiciones de funcionamiento. Un buen cristal tiene una inestabilidad menor que 3×10^{-7} partes/mes.

Generalmente los frecuencímetros digitales permiten recalibrar el oscilador actuando sobre algún componente del circuito que influye sobre la frecuencia. Se usa un patrón de frecuencia externo de suficiente exactitud para la recalibración. En algunos frecuencímetros es posible reemplazar el oscilador propio por otro exterior de mayor exactitud, es el caso de la Figura 20.

La tensión de alimentación también ejerce cierta influencia sobre la frecuencia del oscilador.

8 Medición Digital de un Período

Lo visto respecto al error de una cifra, permite entender la inconveniencia de medir frecuencias bajas. En ese caso es preferible medir la duración del período.

La operación que es realizada por el mismo frecuencímetro que en cierto modo invierte las cosas. Ahora la apertura es controlada por el período de la incógnita. El circuito de entrada tiene un comparador de tensiones de modo que cuando la incógnita pasa en sentido creciente por cierto nivel de tensión de referencia emite un pulso que llega al comando K y abre la compuerta. Cumplido el número de ciclos que determina el divisor, un nuevo pulso cierra la compuerta terminando el recuento.

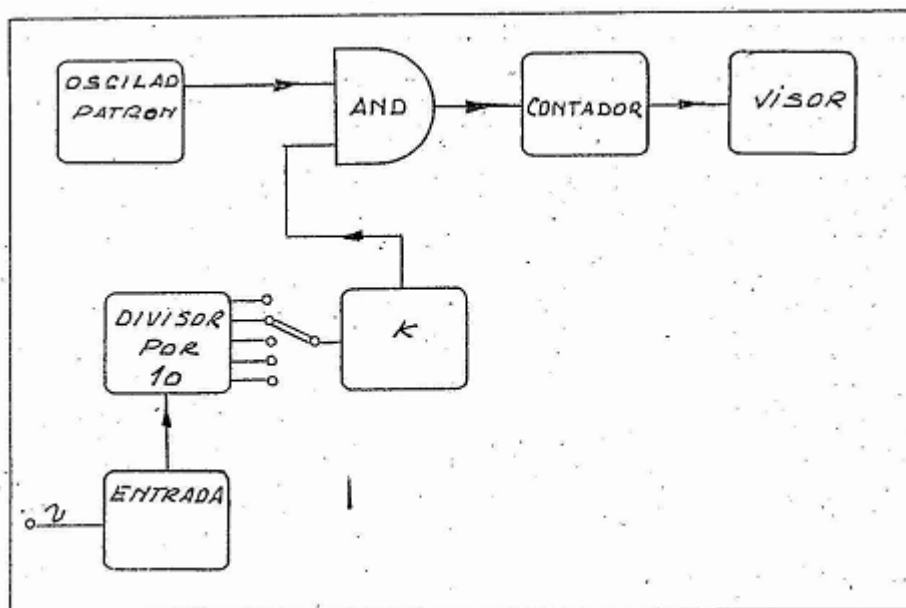
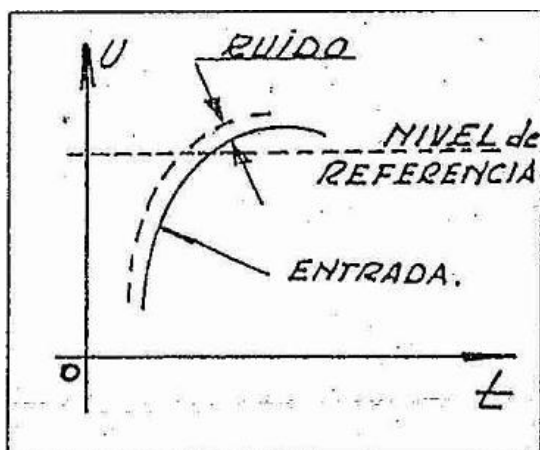


Figura 22: Esquema de un medidor de período

Si por ejemplo la frecuencia del oscilador es de 1 MHz y se mide un solo período de la incógnita, el contador exhibirá la duración de dicho periodo en microsegundos. Si la medición se realiza sobre 10 o más períodos, cambiará en el visor la unidad de tiempo que corresponda o se indicará la coma decimal.



Una causa de error que aparecerá en este instrumento es el ruido que tiene origen en los amplificadores y se superpone a la señal, haciendo impreciso el instante en que ésta pasa por el nivel de referencia, tanto al comenzar como al terminar, el recuento.

9 Algunas Características de los Instrumentos Digitales

La hoja de especificaciones entregada por cada fabricante es una fuente de información, pero debe ser cuidadosamente examinada para poder interpretar correctamente las cualidades del instrumento digital.

Los instrumentos digitales pueden ser portátiles o de banco, o bien los tipos combinados. Los primeros dominan el mercado actual y se presentan en varios tamaños, ofreciendo casi las mismas funciones y característica básicas en cada categoría de precio. Como regla general, son los de menor costo y al ser compactos, ofrecen menos prestaciones que los de mayor tamaño destinados al uso en el laboratorio.

El visor los selectores de alcance y función de los conectores de entrada deben ser fáciles de usar. El posible comprador debe estar al tanto de la visibilidad del visor. Ya vimos que los visores de cristal líquido dependen de la luz ambiental, en tanto que los LED cuentan con auto-iluminación, pero pueden desvanecerse en medio de una luz intensa.

La selección del alcance y de la función se puede realizar de varias maneras, por ejemplo por medio de un par de llaves rotativas, una para el alcance y otra para la función.

Los instrumentos comerciales generalmente se clasifican por el número de dígitos o por el número de funciones. Por lo cual si se definen claramente estos parámetros se reduce el número de modelos que hay que estudiar para tomar una decisión. A continuación se explica el significado de los parámetros más comunes de los instrumentos digitales.

9.1 Flexibilidad

Los instrumentos digitales pueden ser sumamente flexibles. Algunos tienen unidades enchufables, otros se les pueden adicionar o cambiar algunas tarjetas del circuito impreso, permitiendo así una gran variedad de características.

Cuando se prevé la necesidad de tener flexibilidad en aplicaciones futuras resulta útil la elección de un instrumento que pueda ser usado en un sistema de procesamiento de datos, para lo cual se requiere disponer de salida RS232, USB o Ethernet.

9.2 Número de Dígitos y Sobrerrango

El número de dígitos se refiere al número máximo de NUEVES (dígitos completos) que es capaz de entregar a la salida en el indicador numérico, esto implica el número de dígitos completos.

Muchos instrumentos digitales disponen cierta capacidad de sobrerrango, el cual no es un dígito completo, ya que solamente puede tomar valor de 1.

Supóngase un indicador de un instrumento digital, cuya lectura máxima es “1999”.

Este dígito de sobrerrango permite al usuario hacer lecturas arriba del valor de plena escala sin alterar las características de sensibilidad y exactitud.

Ejemplo:

Si una señal cambia de 9,99 a 10,01 V y tenemos un instrumento digital sin dígito de sobrerrango y con tres dígitos efectivos, puede medir hasta: 9,99 V ó si se cambia de rango 10,0 V. Como puede observarse en éste proceso de medida se pierde la información que corresponde a 0,01 V

El mismo instrumento digital con un dígito de sobrerrango es capaz de medir el valor 10,01 V sin tener que cambiar el rango y sin pérdida de sensibilidad. Generalmente, la denominación de los instrumentos digitales con dígitos efectivos y dígito de sobrerrango se escribe:

Denominación del Instrumento en dígitos	Máxima lectura
3 1/2	1999
4 1/2	19999
5	99999
5 1/2	199999
6 1/2	1999999
7	9999999

9.3 Sensibilidad y Resolución

La sensibilidad de un instrumento digital es la habilidad de responder a cambios pequeños en la señal de entrada. Por ejemplo un instrumento de 5 dígitos con un rango de 100mV a plena escala tiene una sensibilidad de 1μV.

El dígito menor significativo tendría un valor de 1μV. Esto es lo que vimos anteriormente con la sigla LSD.

Sin embargo estos términos: Resolución y sensibilidad están relacionados entre sí pero no deben confundirse. La Resolución es un número que puede expresarse sin unidades.

Ejemplo:

En un instrumento de 5 dígitos (99999) se tiene una resolución de una parte en 100.000, o bien del 0,001%, ya que:

$$\text{Resolución} = \frac{1}{100.000} = 0,00001 = 0,001\%$$

La sensibilidad, puede expresarse matemáticamente como el producto de la resolución por el rango a escala total, esto es:

$$\text{Sensibilidad} = \frac{\text{Resolución} \times \text{Valor a plena escala}}{100} =$$

Para el caso de un instrumento digital de 5 dígitos y con escala de 100mV.

$$\text{Sensibilidad} = \frac{0,001\% \times 100mV}{100} = 1\mu$$

9.4 Exactitud:

Dada la complejidad de los instrumentos digitales, es difícil determinar las fuente de error que introducen inexactitud, por lo cual los fabricantes generalmente especifican la exactitud total.

A continuación se muestran como ejemplo los errores de un instrumento digital específico.

Factor	Error
•Linealidad del integrador	• $\pm 0.002\%$
•Corrimiento en 24Hs. A plena escala	• $\pm 0.0005\%$
•Corrimiento de cero	• $\pm 0.001\%$
•Corrimiento de atenuadores	• $\pm 0.003\%$
•Corrimiento en 6 meses	• $\pm 0.003\%$

Exactitud publicada = $\pm 0.0095\%$

Para que las especificaciones de exactitud sean más concretas deben incluirse los datos correspondientes a temperatura, humedad, variaciones de línea y variación en el tiempo, bajo las cuales se da la exactitud. Estas condiciones dan el comportamiento real del instrumento en condiciones de operación: Por ejemplo si el fabricante especifica sus características de exactitud para $(25 \pm 5)^\circ\text{C}$ esto indica que el instrumento puede operarse en condiciones ambientales más o menos normales. Si en cambio la exactitud solo se garantiza para $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$, entonces este instrumento solo podrá emplearse en condiciones de laboratorio.

La exactitud publicada por el fabricante debe incluir el tiempo durante el cual es válida, esto puede ser 30 días, 90 días, 6 meses o hasta uno o dos años. Al terminar éste periodo el instrumento requiere de un proceso de calibración.

La exactitud se especifica como un porcentaje de la lectura más un porcentaje del rango de lectura. La parte correspondiente al por ciento del rango, también puede expresarse como $\pm X$ dígitos, De tal manera que se puede dar la misma especificación en las siguientes dos formas:

Para un instrumento digital de cuatro dígitos:

- $\pm 0,01\%$ de la lectura $\pm 0,001\%$ del rango
- $\pm 0,01\%$ de la lectura ± 1 dígito.

En algunos casos es posible que la exactitud de un instrumento sea menor que su resolución. Por ejemplo un instrumento digital de cuatro dígitos tiene una resolución de $0,01\%$, o bien una parte en 10.000, mientras que la exactitud puede ser: $\pm 0,05\%$

Para muchas aplicaciones esta exactitud es suficiente, sin embargo a veces es necesario observar las variaciones de alguna magnitud con una resolución de $0,01\%$. En estos casos lo que se requiere es que las lecturas se mantengan con la misma escala; esto es que, el instrumento tenga buena linealidad, estabilidad en el tiempo y bajo ruido.

9.5 Estabilidad a Corto Plazo

A diferencia de la exactitud el término estabilidad no está relacionado con un patrón de medición, sino más bien indica que tan constante permanece una medida generalmente especificada en un término de 24 horas con variaciones de: $\pm 1^\circ\text{C}$ ó $\pm 5^\circ\text{C}$.

El parámetro estabilidad a corto plazo le indica al usuario que tan bueno es un instrumento digital para realizar medidas relativas. Esta especificación se utiliza cuando se hacen mediciones por comparación, es decir se mide primero un patrón conocido y posteriormente se mide la cantidad desconocida por comparación con la medida anterior.

9.6 Coeficiente de Temperatura

El coeficiente de temperatura (T_c) es la cantidad de cambio en exactitud por grado de temperatura que sale fuera del rango de temperatura para lo cual se ha especificado la exactitud básica.

Los errores calculados por medio del T_c serán aditivos en la exactitud básica.

Para calcular los errores debe conocerse el rango de temperaturas que puede tolerar el instrumento según su diseño.

Supóngase por ejemplo para un instrumento digital que se le ha especificado una exactitud determinada para: $25^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ y se desconoce la exactitud al operar a 40°C .

Si el T_c vale $0,0004\%/^{\circ}\text{C}$, entonces la exactitud a 40°C será:

Exactitud básica: a $25^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C} = \pm(0.008\% \text{ de la lectura} + 0.002\% \text{ rango})$

Exactitud a $40^{\circ}\text{C} = \pm(0.012\% \text{ de lectura} + 0.006\% \text{ de rango})$

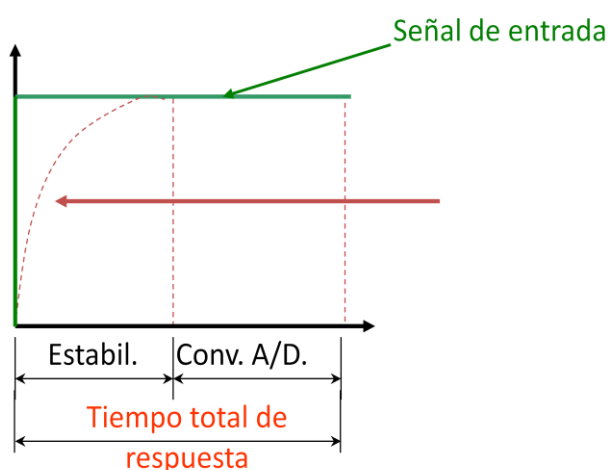
9.7 Rapidez de Respuesta

Existen dos cuestiones que hoy se conocen acerca de la rapidez de un instrumento digital.

- El tiempo que requiere para responder a un cambio en la señal de entrada
- Cuántas lecturas puede realizar en un segundo.

El tiempo total de respuesta de un instrumento digital general se especifica para el peor de los casos, el cual sucede cuando se aplica un escalón a la entrada cuya amplitud sea igual al valor de lectura plena escala.

Como se ilustra en la figura siguiente el tiempo de respuesta está compuesto en dos partes, esto es el tiempo necesario para que se establezca el valor de la salida del acondicionador y el tiempo empleado en el convertido A/D para realizar la conversión.



El tiempo de retardo necesario entre la aplicación de la señal y el punto en que se realiza la conversión A/D dependerá de los siguientes parámetros.

- El tipo de medición a realizar, DC o AC, resistencia, etc.
- El tipo de filtro de entrada.
- El rango empleado.

9.8 Impedancia de Entrada

Muchos instrumentos digitales tienen a su entrada circuitos a base de transistores con los cuales se logran impedancias de entrada del orden de $10\text{ M}\Omega$ en las escalas bajas, en las escalas de mayor rango como 100 V y 1000 V normalmente la impedancia se reduce debido a los divisores de tensión asociados.

Para que la impedancia de entrada esté bien caracterizada debe de incluir la capacidad parásita en paralelo con la parte resistiva y además cuando se trata de un instrumento para uso en alta frecuencia es decir para frecuencias del orden de MHz entonces en algunos casos se especifica la inductancia distribuida.

9.9 Función HIGH LOW

Los multímetro digitales del tipo laboratorio suelen tener como óhmetro un selector de HIGH - LOW que selecciona la tensión aplicada por el generador de corriente interno en los bornes del elemento a medir.

Para medir resistencias normales se utilizan los bornes HIGH - COM correspondientes a una tensión de salida de 2 V . Para las mediciones sobre semiconductores la tecla o bornes LOW - COM corresponde a una tensión de salida de 180 mV para no destruir el elemento de prueba.

9.10 Tensiones Parasitas

Las tensiones parásitas llamadas de MODO COMUN, son aquellas debidas al hecho de que la masa del multímetro y la masa de la señal a medir no se encuentran siempre al mismo potencial, es por ello que algunos instrumentos digitales poseen entrada flotante, (esto es que los bornes se encuentran aislados de la masa del chasis del aparato) que le permite hacer medidas en las cuales las tensiones parásitas debidas al MODO COMUN son suprimidas o fuertemente atenuadas

9.11 Otras Funciones

En instrumentos de alta exactitud y de diseño muy elaborado es posible realizar, automáticamente un estudio estadístico de la magnitud incógnita; en estos casos el instrumento repite rápidamente un número de mediciones, y en el visor se muestra la media aritmética, la desviación normal y los valores máximos y mínimos por ejemplo.