

Resumen de Laboratorio

Multímetros

DC: Corriente directa (Direct Current): corriente que, una vez alcanzado el régimen permanente, es constante a lo largo del tiempo.

AC: Corriente alterna (Alternate Current): corriente que varía con el tiempo.

Valor medio:

$$V_m = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$$

Valor eficaz (RMS, root mean square):

El valor eficaz de una señal en AC es el valor de la señal en DC que deberíamos aplicar a una carga resistiva para que se produzca la misma disipación de energía que si conectásemos a la misma carga la señal de AC.

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt}$$

Regulación de carga de una fuente de tensión:

La regulación de carga es la capacidad que tiene una fuente de alimentación de regular la tensión solicitada con independencia de la corriente.

El porcentaje de regulación de carga ($\eta_{c\%}$) indica que porcentaje del voltaje en vacío (V_o) disminuirá cuando nos encontremos a tensión a plena carga (V_{pc}). Esta disminución se debe a la resistencia interna de la fuente (R_G).

$$\eta_{c\%} = \frac{V_o - V_{pc}}{V_o} \cdot 100$$

Tiempo de crecimiento (rise time):

Es el tiempo que requiere la onda para pasar del 10% hasta el 90% de su valor. Se observa en la figura 1.

En un circuito RC de primer orden se puede obtener mediante la siguiente fórmula:

$$t_c = 2,2 RC$$

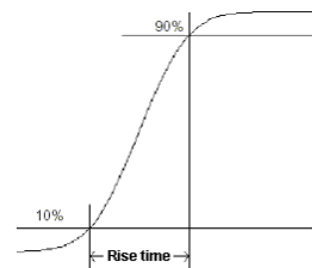


Figura 1 – Tiempo de crec.

Frecuencia de corte:

Cuando la tensión de salida cae 3 dB respecto de la de entrada. Es equivalente a cuando la tensión de salida cae al 70,7 % respecto de la de entrada, o cuando se disipa la mitad de la potencia, o cuando hay un desfase de 45° respecto de la tensión de entrada.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Ancho de banda (bandwidth):

Es el rango de frecuencias en las cuales la señal de salida sufre una caída de potencia respecto de la de entrada menor a 3 dB.

Operando con las dos fórmulas anteriores se llega a la relación:

$$t_c \cdot f_c = 0,35$$

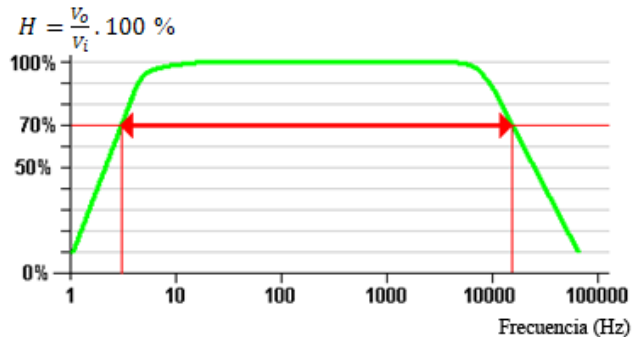


Figura 2 - Ancho de banda.

Ciclo de servicio (Duty Cycle) de una señal:

Se define como el tiempo en el que la señal permanece en alto dividido el período, se expresa en %.

$$DC = \frac{\text{tiempo en alto}}{T} \cdot 100 \%$$

Respuesta en frecuencia de un multímetro (BW):

Es el rango de frecuencias de utilización, es decir, en el que el instrumento cumple con la especificación definida por el fabricante. Esto nos permite conocer en que frecuencias puede ser usado correctamente. El punto crítico en este caso es la especificación de incerteza del fabricante.

Multímetros disponibles en el laboratorio:







Tipo	Multímetro	DC	AC	Observaciones	R_{int}
Analógicos	Modo Normal	$\langle V \rangle$	 $\langle V \rangle.FF$	$FF_{MO} = 2,22$ $FF_{OC} = 1,11$	$S V_{fe}$
	Modo OUTPUT	$\langle V \rangle$	 $\langle V \rangle.FF$		
Digitales	DVM	$\langle V \rangle$	 $\langle V \rangle.FF$		$10 M\Omega$
	True-RMS	$\langle V \rangle$	 $\sqrt{\langle V^2 \rangle}$		$10 M\Omega$

Tabla 1 – Cómo funcionan los multímetros del laboratorio.

Referencias:

- $\langle V \rangle$ Calcula el valor medio
-  Filtra la componente continua y atenúa las bajas frecuencias (capacitor en serie)
-  Rectifica a media onda (MO) o a onda completa (OC) según el instrumento
- $\langle V \rangle.FF$ Calcula el valor medio por el factor de forma ($FF = \frac{V_{ef}}{\langle V \rangle}$)
- $\sqrt{\langle V^2 \rangle}$ Calcula el valor eficaz
- $S V_{fe}$ Sensibilidad por el valor a fondo de escala

Cálculo y propagación de las incertezas y corrección de los errores sistemáticos.

Las incertezas en las mediciones se calculan a partir de las especificaciones de los manuales de los instrumentos.

Para los multímetros digitales vienen expresadas en la forma $\pm (\% \text{ lectura} + n \text{ dígitos})$, donde $n \text{ dígitos} = n \cdot \text{resolución}$. La *resolución* también se especifica en el manual para cada escala, y en el caso de los instrumentos autorango se calcula como el rango dividido el número de cuentas. Es decir

$$\text{resolución} = \frac{\text{rango}}{\# \text{ cuentas}}$$

Cabe mencionar que el valor de la resolución, puede obtenerse rápidamente, sabiendo que será un número formado por un uno en la posición correspondiente al último dígito representativo del valor medido escrito con todos los dígitos leídos (si se midió 0,60 V entonces la resolución será de 0,01 V).

En los instrumentos analógicos el manual especifica la clase del instrumento como un porcentaje del valor a fondo de escala, y se calcula la incerteza de la medición sumándole a este valor un error de lectura que consideramos como la mitad de la mínima división.

$$\Delta X = \text{clase} \cdot X_{fe} + \frac{1}{2} \frac{X_{fe}}{\# \text{ cuentas}}$$
$$\varepsilon_X = \frac{\Delta X}{X_m} = \frac{\text{clase} \cdot X_{fe}}{X_m} + \frac{1}{2} \frac{X_{fe}}{\# \text{ cuentas}} \frac{1}{X_m}$$

Donde ΔX es el error absoluto del valor medido, X_{fe} es el valor a fondo de escala, ε_X es el error relativo del valor medido, X_m es el valor medido y $\# \text{ cuentas}$ es el número de divisiones de la escala.

Instrumento: UNI-T UT30F (DVM)
Cuentas 2000
Incerteza: X % de lectura + X dígitos
Impedancia de entrada: $R_{int} = 10M\Omega$
Caída en amperímetro de 200mV a FE

Instrumento: UNI-T UT60E (TRUE)
Cuentas 4000
Incerteza: X % de lectura + X dígitos
Impedancia de entrada: $R_{int} = 10M\Omega$
Caída en amperímetro de 200mV a FE

Instrumento: TRIPLETT 630-APLK (Analógico)
Cuentas: 50
Sensibilidad: 20 k Ω /V
Incerteza de clase: X % de plena escala
Impedancia de entrada: $R_{int} = S \cdot V_{max} = 200k\Omega$
Caída en amperímetro de 250mV a FE

Osciloscopio

Diagrama de bloques del sistema horizontal y vertical del osciloscopio.

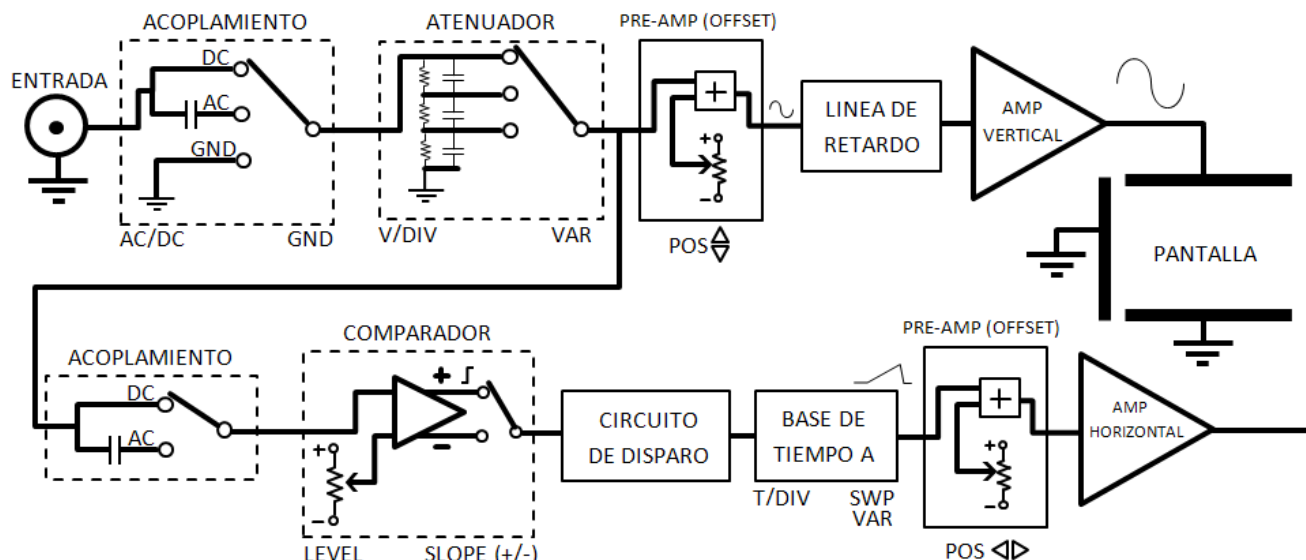


Figura 3 - Diagrama de bloques del sistema horizontal y vertical del osciloscopio.

Sistema vertical:

Al comienzo la señal ingresa a la sección de acoplamiento, donde si se selecciona DC, pasa directamente, si se selecciona AC se le filtra la componente de continua y se atenúan las bajas frecuencias, y si se selecciona GND, se conecta directamente a tierra, según la figura 1. Luego, pasa por un atenuador, donde se atenúa la señal según la escala que se quiera observar en la pantalla, en el eje vertical. En este momento se bifurca la señal al sistema horizontal. A continuación, siguiendo con el sistema vertical, la señal pasa por un preamplificador que es el responsable de añadir un offset que el usuario puede modificar mediante la perilla POS (vertical). Finalmente pasa por una línea de retardo, para sincronizarse con la señal horizontal (ya que el retardo de la misma es mayor), y por un amplificador que adecua la señal antes de ingresar a las placas de deflexión vertical.

Sistema horizontal:

En primer lugar, la señal proveniente de la bifurcación en el sistema vertical ingresa en una etapa de acoplamiento. Si se selecciona la opción AC se filtra la componente continua y se atenúan las bajas frecuencias, y si se deja en DC, la señal no se ve modificada. Luego la señal ingresa en un comparador donde se definen las opciones del Trigger, como el LEVEL, que indica a partir de qué punto deberá comenzar a dibujarse la señal, y el SLOPE, que indica con qué polaridad estará sincronizada la misma. Luego pasa por un circuito de disparo y Base de tiempo A, donde se modifica para cumplir con las escalas definidas por la perilla T/DIV del tablero. Finalmente, al igual que en el sistema vertical, se le agrega un offset definido por la perilla POS (horizontal), y la señal es amplificada para que las placas del sistema horizontal desvíen correctamente el haz de electrones.

La tensión a medir se aplica a las placas de desviación vertical oscilante de un tubo de rayos catódicos (utilizando un amplificador con alta impedancia de entrada y ganancia ajustable) mientras que a las placas de desviación horizontal se aplica una tensión de diente de sierra.

Controles del osciloscopio:

Definimos a continuación el funcionamiento de cada perilla del osciloscopio.

Controles del haz:

- Intensidad: Ajusta el brillo de la señal en la pantalla.
- Foco: Ajusta la nitidez de la señal en la pantalla, variando el ancho del haz de electrones.
- Iluminación: Varía la iluminación externa de la pantalla (lamparita).
- Rotación del trazo: Nos permite alinear el haz con el eje horizontal de la pantalla.

Controles del canal vertical:

- Modo vertical: Selecciona los modos de operación entre CH1, CH2, DUAL, ADD.
 - CH1: Visualiza sólo en canal 1.
 - CH2: Visualiza sólo en canal 2.
 - DUAL: Visualiza ambos canales.
 - ADD: Visualiza la suma algebraica de los dos canales.
- Chop: En modo DUAL, permite seleccionar como se trazan las señales en la pantalla. Entre el modo alternado (para medias y altas frecuencias), donde se traza la señal 1 completa, y luego la señal 2; y el modo choppeado (para bajas frecuencias, Time/DIV en 1mS o superior), donde se traza una pequeña parte del canal 1, luego una del canal 2, y así hasta completar el trazado completo.
- CH2 Inv: Invierte la entrada del canal 2. (en el modo ADD, si las señales son iguales debería ver un cero)
- Position: Este control consta de un potenciómetro que permite mover verticalmente la señal.
- Volt/div: Selecciona la escala del eje vertical, desde 1 mV/div a 5 V/div, en 12 pasos en secuencia 1-2-5. (1mV 2mV 5mV 10mV 20mV 50mV 0,1V 0,2V 0,5V 1V 2V 5V)
- AC-DC: En modo DC, se deja pasar la señal completa, en modo AC se filtra la componente continua y se atenúan las bajas frecuencias (capacitor en serie).
- GND: Desconecta del canal correspondiente la señal externa y lo conecta a tierra, para facilitar la calibración.
- VAR: Permite un ajuste fino de la escala vertical. Al moverla de la posición CAL (extremo horario) las escalas fijas indicadas en la perilla Volt/div dejan de tener validez.

Controles del canal horizontal:

- A Time/div: Selecciona la escala del eje horizontal de tiempo, desde 0,1 μ Seg/div a 0,5 Seg/div, en 21 pasos en secuencia 1-2-5. (0,1 μ S 0,2 μ S 0,5 μ S 1 μ S 2 μ S 5 μ S 10 μ S 20 μ S 50 μ S 0,1mS 0,2mS 0,5mS 1mS 2mS 5mS 10mS 20mS 50mS 0,1S 0,2S 0,5S)
- SWP VAR: Permite un ajuste fino de la escala horizontal. Al moverla de la posición CAL (extremo horario) las escalas fijas indicadas en la perilla Time/div dejan de tener validez.
- SWP UNCAL: Deshabilita la perilla SWP VAR, dejándola calibrada.

- **Position:** Este control consta de un potenciómetro que permite mover horizontalmente la señal.
- **B Time/div:** Selecciona la escala de la BASE B de tiempo, desde 0,1 μ Seg/div a 0,5 mSeg/div, en 12 pasos en secuencia 1-2-5.
- **X10 MAG:** Amplifica la señal horizontalmente 10 veces.
- **X-Y:** Desconecta el sistema de barrido interno del osciloscopio y conecta la señal del canal 2 al sistema vertical. Esto permite visualizar curvas de respuesta o las figuras de Lissajous.

Controles del disparo:

- **Trigger source:** Selecciona la fuente del disparo entre CH1, CH2, LINE (una forma de onda AC es usada como señal de sincronía), EXT (se usa la señal externa conectada como fuente de sincronía).
- **Coupling:** Selecciona el modo de sincronía, entre DC (modo normal) y AC (se atenúan las frecuencias menores a 10 Hz, osea que se filtra la continua del canal horizontal para poder sincronizar). También suelen aparecer opciones para otras frecuencias como HF-REJ, TV, LINE (50 Hz), HF, LF; estas opciones adicionales varían según el osciloscopio.
- **Slope:** Define si se dispara en flanco ascendente o descendente para el nivel seleccionado.
- **Level:** En modo de disparo manual, ajusta el nivel de señal a partir del cual el sistema de barrido horizontal comienza a trazar la señal en pantalla.
- **Level look:** Bloquea el control de Level.
- **Normal-Auto-Single:** Son modos del sistema de trigger de barrido que determinan si se debe o no dibujar una señal en la pantalla.
 - NORM: Solo dibuja si la señal llega al nivel de trigger.
 - AUTO: Dibuja siempre.
 - SINGLE MODE: Dibuja una sola vez la señal, si llega al nivel de trigger.
- **Holdoff:** Se utiliza cuando deseamos sincronizar en la pantalla señales formadas por trenes de impulsos espaciados en el tiempo (para que no se dispare nuevamente la señal en el medio de un período). Posee un conmutador que activa un potenciómetro donde podemos seleccionar un tiempo de retardo en el cual no se produce disparo.
- **Horizontal Display (A; A int. B; B; Trig. B):** Selector del modo que se muestra en la pantalla.
 - A: Se muestra la base de tiempo principal.
 - A int. B: Muestra la base de tiempo principal y sobre ella la parte de la base B (se ve intensificada).
 - B: Muestra en toda la pantalla solo la base B en la escala correspondiente a B Time/div.
 - Trig. B: La base B reacciona a un determinado punto de disparo. Se reduce el jitter.
- **DELAY TIME:** Modifica el tiempo de inicio de barrido de la BASE B respecto de la A, para poder observar en la base B la señal de la BASE A a partir de un determinado retraso temporal.
- **TRIG. ALT:** Elimina el desfase temporal entre dos señales producidas por la misma fuente, para medir diferencias en amplitud centradas. (no sirve para medir desfases)

Incertezas en el osciloscopio:

Incertezas para el sistema vertical: (amplitud)

De lectura (o de apreciación):

$$e_{abs} = \frac{1}{2} \text{ mínima división de la escala} = \frac{1}{10} \text{ escala}$$

$$e_{rel} = \frac{e_{abs}}{(\text{valor medido})} = \frac{\frac{1}{10} \cdot \text{escala}}{(\text{divisiones medidas}) \cdot \text{escala}} = \frac{1}{10} \frac{1}{(\text{divisiones medidas})}$$

$$e_{rel \text{ de lectura } \%} = \frac{10}{(\text{divisiones medidas})}$$

De sensibilidad (sensitivity accuracy):

Depende de la escala, según el manual del GOOD-WILL

- **3%** en las escalas de 5 mV a 5 V/div (de 10 a 35°C)
- **5%** en las escalas de 1 mV y 2 mV/div (de 10 a 35°C)

Incertezas para el sistema horizontal: (tiempo)

De lectura (o de apreciación):

$$e_{rel \text{ de lectura } \%} = \frac{10}{(\text{divisiones medidas})}$$

De barrido (sweep time accuracy):

- **3%** en modo normal (de 10 a 35°C)
- **5%** en modo MAG X10 (**8%** para 10 nS a 50 nS/div) (de 10 a 35°C)

De linealidad (linearity accuracy):

- **3%** en modo normal
- **5%** en modo MAG X10 (**8%** para 10 nS a 50 nS/div, las 3 escalas más chicas)

Puntas del osciloscopio:

Las puntas de prueba de osciloscopio tienen la función de hacer llegar la señal hasta la entrada del osciloscopio sin distorsionarla y protegiéndola del ruido. Idealmente estas puntas no deberían cargar el circuito bajo prueba.

Existen dos tipos de puntas: activas y pasivas. En nuestro caso nos interesa estudiar las puntas pasivas (con resistores y capacitores).

	Cop	Rop	
X1	$\cong 200 \text{ pF}$	$\cong 1 \text{ M}\Omega$	Carga más Atenúa menos
X10	$\cong 20 \text{ pF}$	$\cong 10 \text{ M}\Omega$	Carga menos Atenúa más

Tabla 2 - Capacidad y resistencia equivalente del conjunto osciloscopio-punta, según se utilice la sonda atenuadora en X1 ó X10.

Se puede considerar que la medición no es afectada por el efecto de carga siempre y cuando la capacidad equivalente del circuito sea mucho mayor que Cop, y la resistencia equivalente del circuito sea mucho menor que Rop.

$$C_{circ} \gg C_{op}$$

$$R_{circ} \ll R_{op}$$

Modo X-Y y figuras de Lissajous

La expresión para medir la diferencia de fase entre dos señales con el modo X-Y es:

$$\alpha = \arcsen \frac{Y_{intersec}}{Y_{max}}$$

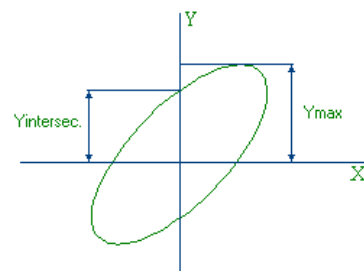


Figura 4 - Figura de Lissajous

Contadores convencionales

Este instrumento cuenta eventos, pero permite, a través de diferentes modos, medir la frecuencia o el período de una señal, la relación de frecuencias de dos señales, el intervalo de tiempo entre dos eventos determinados o simplemente la cantidad total de eventos.

A continuación se comentan brevemente los modos de funcionamiento del contador convencional y las consideraciones que deben tenerse en cada uno para realizar mediciones correctas.

Medición de frecuencias:

Para medir frecuencias el contador universal cuenta la cantidad de eventos de la señal de entrada que registra en un determinado tiempo, dado por oscilador interno y un divisor de frecuencia (control GATE TIME, tiempo de compuerta). En la figura 1 se muestra el diagrama de bloques del contador en este modo de operación.

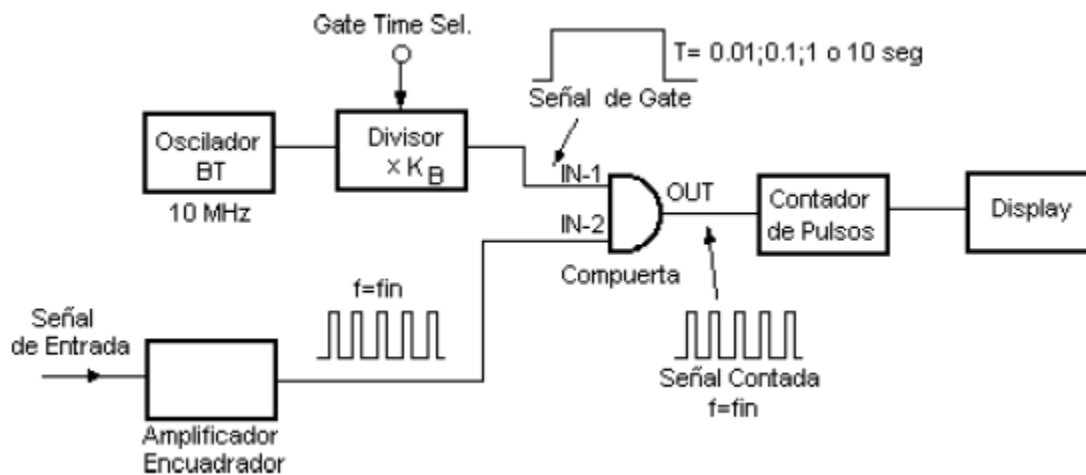


Figura 5 - Diagrama de bloques de un contador convencional en modo medición de frecuencias.

Medición de períodos:

Para medir períodos, lo que debe contarse es el tiempo transcurrido entre dos eventos determinados de la señal de entrada. En este caso es la señal de entrada la que controla la compuerta inhibiendo la salida de los pulsos, y la señal que se cuenta es la generada por el oscilador interno. Este funcionamiento se ejemplifica en el diagrama de bloques del instrumento en modo períodos (figura 2).

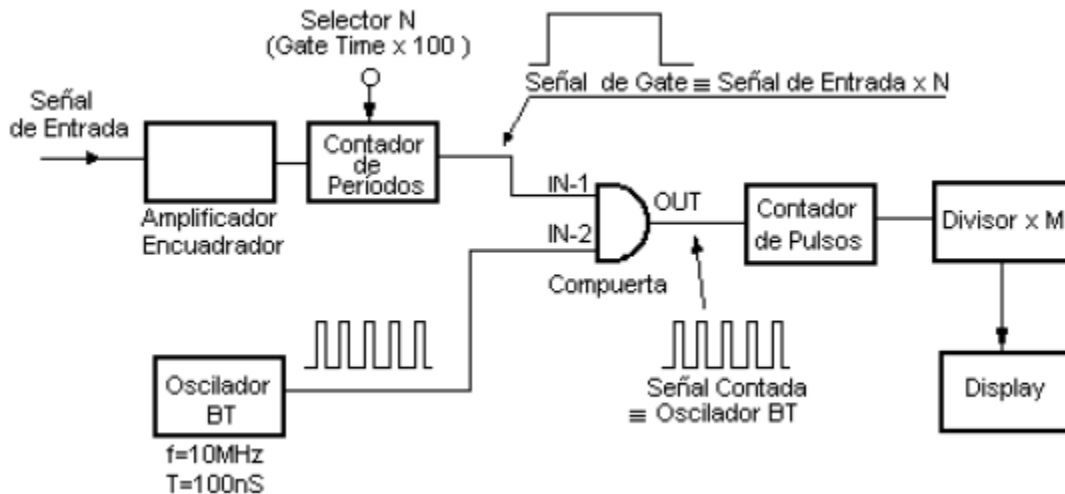


Figura 6 - Diagrama de bloques de un contador convencional en modo medición de períodos.

Medición de intervalos de tiempo:

Lo que se cuenta en este modo es la cantidad de pulsos de la base de tiempos ocurridos entre un evento de la señal de entrada del canal 1 y uno de la señal de entrada del canal 2 (que pueden ser la misma señal o dos señales diferentes). Esto se logra conectando la señal del canal 1 a la entrada de set de un flip-flop, y la señal del canal 2 a la entrada del reset. De esta forma un evento en la señal 1 pondrá la salida del flip-flop en estado alto, habilitando la compuerta para contar los pulsos de la base de tiempos hasta que un evento en la señal 2 volverá la salida del flip-flop a un estado bajo, inhibiendo la compuerta.

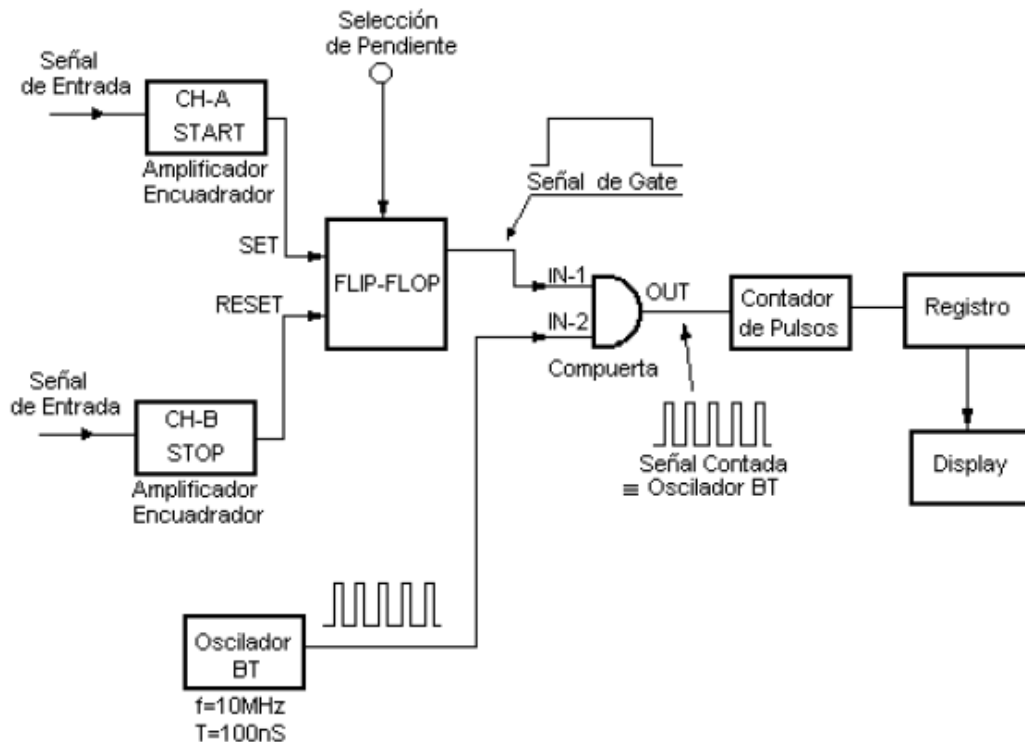


Figura 7 - Diagrama de bloques de un contador convencional en modo medición de intervalos de tiempo.

Medición de relaciones de frecuencia:

Para medir la relación de frecuencia de dos señales se utiliza la de menor frecuencia para controlar la apertura y cierre de la compuerta (generalmente conectada al canal B). De esta manera se cuentan los pulsos de la señal de frecuencia más alta ocurridos entre los eventos de la señal de frecuencia más baja (como se ve en la figura 4).

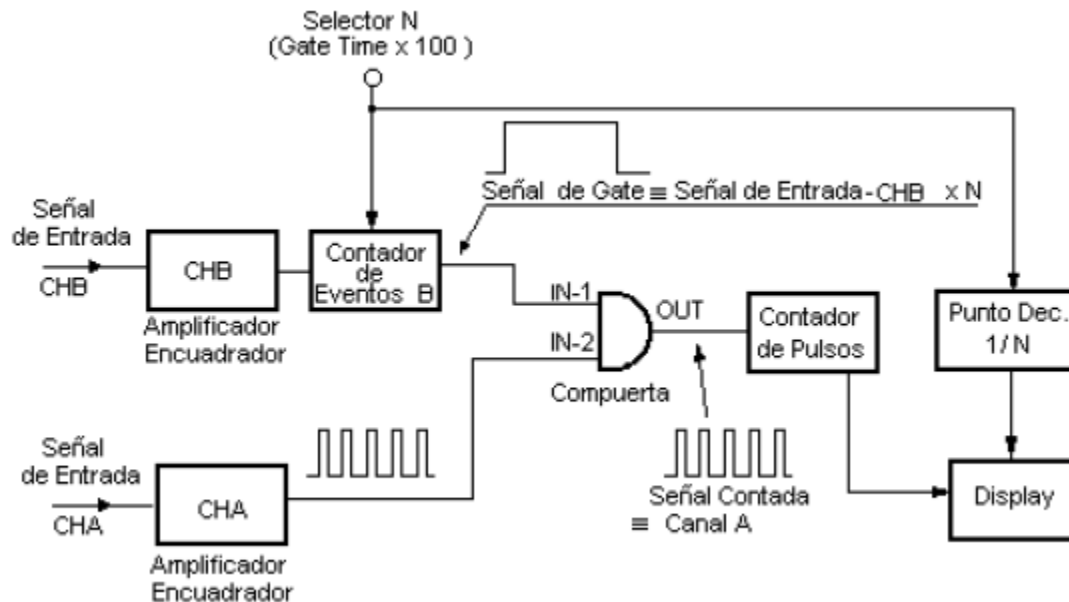


Figura 8 - Diagrama de bloques de un contador convencional en modo medición de relación de frecuencia.

Incertezas:

En las mediciones con contadores debemos considerar en principio cuatro fuentes de incertezas, aunque dependiendo del modo actuarán unas u otras.

- **Cuantización:** Esta incertidumbre está originada en el hecho de que el registro contador detecta únicamente uno de los flancos de la señal contada (salida de la base de tiempos o señal cuadrada generada a partir de la señal de entrada). De esta forma puede tomarse un pulso por la mitad contando un pulso de más o un pulso de menos. Por este motivo se lo llama también incertidumbre de ± 1 cuenta. Esta incerteza se calcula como la inversa del número de cuentas realizadas por el instrumento (N_c) (valor del display SIN considerar la coma decimal).

$$\xi_{\pm 1 \text{ cuenta}} = \frac{1}{N_c} \cdot 100 \%$$

- **Base de tiempo:** La señal que genera el oscilador interno tiene una incertidumbre asociada, que está dada por factores como el envejecimiento y la inestabilidad térmica.

Se puede encontrar en el manual del instrumento diversos factores con su respectiva incertidumbre expresada generalmente como ppm (partes por millón, 10^{-6} , 10^{-4} %). En general podemos plantear la siguiente expresión.

$$\xi_{BT} = \xi_{estabilidad} + \xi_{estabilidad\ de\ linea} + \xi_{estabilidad\ térmica} + \xi_{envejecimiento} + \dots$$

- **Trigger (disparo):** El ruido de la señal de entrada puede hacer que el pulso no comience o no finalice en el instante correcto. Esta incertidumbre se da como porcentaje (valor típico de 0,3 %) y disminuye al aumentar la cantidad de períodos promediados (N).

$$\xi_{Trigger} = \frac{0,3\ \%}{N}$$

Donde, según el Time Gate utilizado $N = 100 T_G$.

$$T_G = 0,01\ S \rightarrow N = 1$$

$$T_G = 0,1\ S \rightarrow N = 10$$

$$T_G = 1\ S \rightarrow N = 100$$

$$T_G = 10\ S \rightarrow N = 1000$$

- **Errores sistemáticos:** Este error se debe al tiempo de crecimiento propio del circuito y a la velocidad de propagación de las señales en los cables utilizados.

En la tabla siguiente se muestra qué tipos de incertidumbre deben considerarse para cada uno de los modos de medición.

Incertidumbre	Modo en el cual se considera				Naturaleza
	Frecuencia	Período	Intervalo de tiempo	Relación de frecuencias	
De cuantización $\xi_{\pm 1\ cuenta}$	•	•	•	•	Aleatoria
De la base de tiempo ξ_{BT}	•	•	•		Sistemática
De disparo $\xi_{Trigger}$		•	•	•	Aleatoria
Por errores sistemáticos $\xi_{Sistemática}$			•		Sistemática

Tabla 3 - Tipos de incertidumbre deben considerarse para cada uno de los modos de medición.

Contadores recíprocos

Los contadores recíprocos surgen con la intención de minimizar la incertidumbre de cuantización de los contadores convencionales, que al medir en modo frecuencias es inversamente proporcional a la frecuencia medida. Estos contadores **miden siempre en modo período** e internamente realizan la conversión de ser necesario.

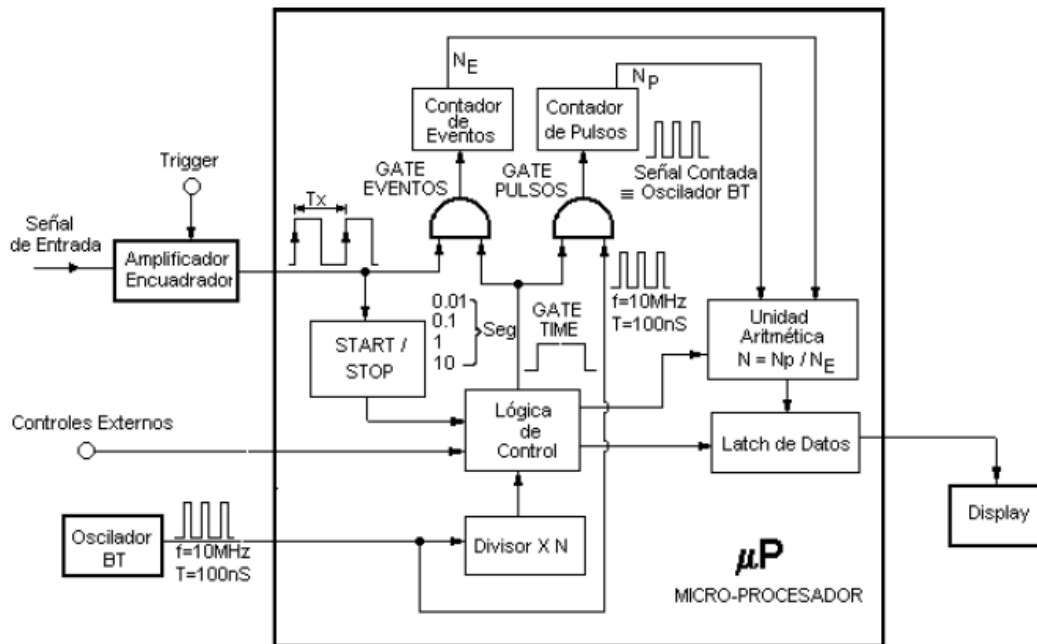


Figura 9 - Diagrama de bloques de un contador recíproco.

Incertezas:

Consideramos las incertezas del modo período, ya que internamente siempre mide en este modo.

- **Cuantización:** Depende de cada contador. El contador recíproco tiene internamente dos contadores, uno que cuenta eventos de la señal de entrada y otro que cuenta pulsos de la base de tiempos. Debido a que la apertura y cierre de la compuerta está sincronizados con la señal de entrada, la incertidumbre de cuantización del primero será nula, por lo que la incertidumbre de cuantización será igual a la incertidumbre de cuantización del contador de pulsos, que para un determinado tiempo de compuerta será aproximadamente constante y puede calcularse como

$$\xi_{\pm 1 \text{ cuenta}} = \frac{1}{N_p} \cdot 100 \% \quad N_p = \frac{GT}{T_{BT}}$$

Siendo GT el Gate Time, y T_{BT} el período de la base de tiempos.

- **Base de tiempo:** Ídem contador universal.
- **Trigger (disparo):** Ídem contador universal.

Frecuencia crítica

En un contador universal convencional, la incertidumbre de cuantización suele ser la que más pesa, y debe tener en cuenta en todos los modos de medición. Como esta incertidumbre se calcula como la inversa del número de cuentas, una medición que cuente más eventos tendrá menos incertidumbre de esta clase. Por esto para medir una frecuencia se usa el modo período si la frecuencia es baja, y el modo frecuencia si ésta es alta.

Para decidir qué es alta y qué es baja se toma como referencia a la frecuencia crítica o de cruce, que se define como *“aquella frecuencia para la que el número de cuentas en modo período es igual al número de cuentas en modo frecuencia”*.

El valor de esta frecuencia depende de la frecuencia del oscilador interno del contador, y de los valores de TIME GATE seleccionados, y puede calcularse como

$$f_c = \frac{f_{bt} N_1}{T_{Gmin} N_2} \quad (2)$$

Donde f_{bt} es la frecuencia del clock (que es fija para un determinado contador), y N_1 y N_2 son las posiciones de compuerta seleccionada en el modo período y frecuencia respectivamente y T_{Gmin} es el tiempo de apertura mínimo de compuerta.

Como se ve en la ecuación la frecuencia de cruce aumenta a medida que aumenta la frecuencia del clock (f_{bt}). Los contadores recíprocos tienen una f_{bt} muy grande que les permite asegurar que siempre va a convenir medir en modo período (porque la frecuencia de cruce resulta ser muy alta).

N2 \ N1	1	10	100	1000
1	$\sqrt{\frac{f_{BT}}{T_{GMIN}}}$	$\sqrt{\frac{f_{BT} \times 10}{T_{GMIN}}}$	$\sqrt{\frac{f_{BT} \times 100}{T_{GMIN}}}$	$\sqrt{\frac{f_{BT} \times 1000}{T_{GMIN}}}$
10	$\sqrt{\frac{f_{BT}}{10 \times T_{GMIN}}}$	$\sqrt{\frac{f_{BT}}{T_{GMIN}}}$	$\sqrt{\frac{f_{BT} \times 10}{T_{GMIN}}}$	$\sqrt{\frac{f_{BT} \times 100}{T_{GMIN}}}$
100	$\sqrt{\frac{f_{BT}}{100 \times T_{GMIN}}}$	$\sqrt{\frac{f_{BT}}{10 \times T_{GMIN}}}$	$\sqrt{\frac{f_{BT}}{T_{GMIN}}}$	$\sqrt{\frac{f_{BT} \times 10}{T_{GMIN}}}$
1000	$\sqrt{\frac{f_{BT}}{1000 \times T_{GMIN}}}$	$\sqrt{\frac{f_{BT}}{100 \times T_{GMIN}}}$	$\sqrt{\frac{f_{BT}}{10 \times T_{GMIN}}}$	$\sqrt{\frac{f_{BT}}{T_{GMIN}}}$

Tabla 4 – Frecuencia de corte según las posiciones de compuerta seleccionadas.
 N1: Modo Período - N2: Modo Frecuencia

Al variar las combinaciones de pendiente de los canales de entrada del contador, y por lo dicho en la introducción teórica estamos midiendo el tiempo transcurrido entre diferentes flancos de señal, como se muestra a continuación.

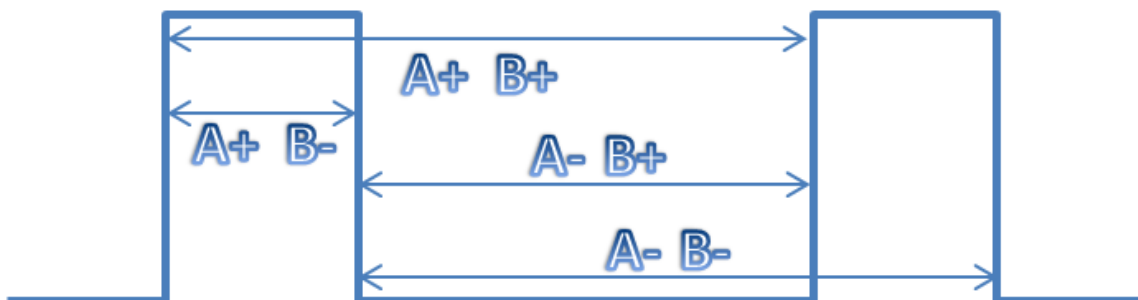


Figura 10 - Período y semiperíodos de la señal que se miden con las diferentes combinaciones de pendientes de los canales de entrada del contador.