

Medición de intervalo de tiempo en forma precisa.

- Introducción

Reconozca los detalles comunes en medición con un contador y elimine los errores potenciales.

Aunque los osciloscopios analógicos y de muestreo convencionales son a menudo usados para medir intervalo de tiempo en forma precisa; un contador de intervalo de tiempo ofrece potencialmente mayor resolución y precisión, aunque el osciloscopio ofrezca la ventaja de visualizar la señal medida, pero por otro lado los contadores pueden medir el tiempo entre dos eventos de 100 picosegundos por ejemplo, cosa que el osciloscopio no puede.

Mediciones precisa en intervalos de muy corta duración son esenciales en mediciones nucleares, en emisiones luminosas, radar y en la caracterización de componentes activos como son los circuitos integrados.

En estos casos, un gran número de factores pueden producir considerables errores cuando se mide intervalos de tiempo.

Consideremos los posibles errores y las formas de minimizarlos.

¿Cuál es una medición precisa?

La precisión de una medición esta dada por:

**Precisión de la medición de intervalo de tiempo = ± 1 cuenta \pm Error de la base de tiempo
 \pm error de Trigger \pm ajuste del nivel de trigger**

Veamos **cada factor de la ecuación:**

- ◆ **\pm Cuentas:** Este factor se refiere al error digital debido a la indeterminación de contar o no el pulso al momento de cerrar la ventana de conteo. Es una medida de la resolución del instrumento y depende de la frecuencia del oscilador. A mayor frecuencia menor será el error de tiempo leído aunque la incertidumbre de más o menos una cuenta siempre estará presente. Así, en un instrumento con reloj interno de 500 MHz, el error de ± 1 cuenta representa un error de ± 2 ns. Varias técnicas están disponibles para aumentar la resolución.
- ◆ **Error de Base de tiempo:** Los factores que pueden afectar la precisión de una medición debido a la base de tiempo incluyen la estabilidad en Corto tiempo del oscilador interno y el corrimiento a largo plazo. La calidad requerida del oscilador interno depende del tipo de medición a realizar; en general las mediciones de tiempos Cortos requieren menor estabilidad. Por ejemplo, si 1 microsegundo es el máximo tiempo a medir y el oscilador interno tiene una resolución absoluta de 1 ns, el oscilador necesita tener una estabilidad de solo 1×10^{-3} , y en ese caso, un oscilador a cristal en un ambiente de aire natural es suficiente. Pero si se realizarán mediciones en el rango de los segundos, en ese caso se requiere mayor estabilidad del oscilador, requiriéndose osciladores a cristal estabilizados en un horno con control de temperatura, lo cual aumenta el costo del instrumento.
- ◆ **Error de Trigger:** Cualquier variación (por ruido o inestabilidad) de la amplitud de la señal de entrada en el punto de disparo de la medición (trigger), puede causar errores de medición. Incorrecto disparo (trigger) puede causar un error, aunque en mediciones de alta velocidad se supone que los tiempos de subida y bajada de las señales de entrada son cortos (nanosegundos) y por lo tanto los errores de trigger son raramente un factor a tener en cuenta. No así en mediciones de baja frecuencia.
- ◆ **Ajuste del nivel de Trigger:** Cualquier error en el ajuste del nivel absoluto del trigger de traslada directamente al error en la medición. O sea, que el ajuste del punto de trigger debe ser perfectamente conocido para evitar un error al tomar un punto de referencia diferente de las señales cuyo intervalo se desea medir.

La resolución de medición obtenida con medidor de intervalo de tiempo convencional está limitada al periodo del reloj interno. Para conseguir una resolución de 1 ns, se requiere un reloj de 1 GHz y circuitos lógicos de alta velocidad. Tal resolución se encuentra en instrumentos de nueva generación y alto costo.

Como trabajan los medidores de intervalo de tiempo.

La fig. 1 muestra un diagrama en bloc simplificado de un contador: la compuerta principal es abierta por el pulso de Inicio (START) proveniente de la salida del Atenuador/conformador/trigger del primer canal, y cerrada por el pulso de PARADA (STOP) de la salida del Atenuador/conformador/trigger del segundo canal.

Las señales que producen el intervalo de tiempo a medir son dos puntos de la misma señal (Ancho de pulso, tiempos de transición, etc.) o de dos señales distintas (relación de frecuencia, fase o intervalos de eventos).

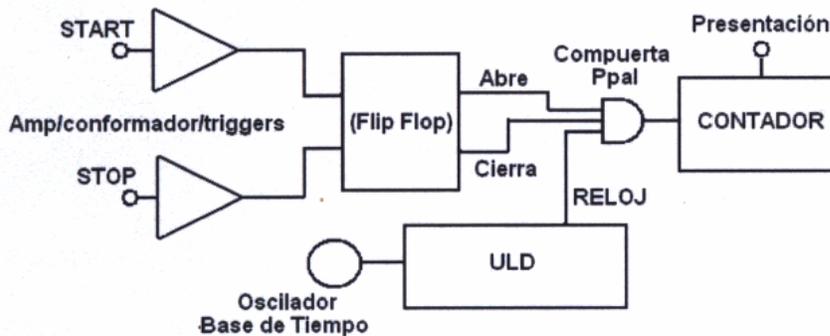


Fig #1a

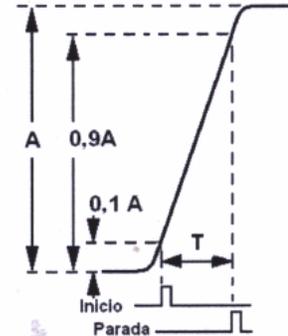


Fig # 1b

Los circuitos conformadores de señal y los controles asociados son de fundamental importancia en el proceso de medición. Un arreglo típico de controles de conformación de pulso de un instrumento típico se observa en la fig.# 1a.

El atenuador es usado para mantener a la señal de entrada dentro del rango dinámico del instrumento. Para mediciones de Intervalo de tiempo, el acoplamiento elegido debe ser DC (sin capacitor de acoplamiento). El acoplamiento AC se utiliza cuando el instrumento mide periodos o frecuencias solamente.

La llave SLOPE (pendiente) permite al contador disparar el conteo al cambiar la señal de positiva a negativa (transición negativa) o de negativa a positiva (transición positiva). El control LEVEL (nivel) permite disparar el conteo en cualquier punto de una transición o amplitud instantánea de la señal, que este dentro del rango dinámico del contador. Este control es de suma importancia en la medición de intervalo de tiempos y esencialmente ajusta el nivel de tensión de referencia al cual el conteo se dispara.

Si se supone que el conformador de entrada esta correctamente ajustado, la salida del amplificador reflejará los puntos precisos de la forma de onda de entrada entre los cuales se hará la medición de tiempo.

La figura #1b ilustra las dos dimensiones del intervalo de tiempo: Tiempo y Voltaje. Si el usuario reconoce este ajuste, la precisión y fiabilidad de la medición se agranda enormemente.

El usuario habitual hace mediciones de frecuencia y no presta atención a este punto, y este descuido en la consideración del punto de ajuste del trigger, es la fuente primaria de error y por eso muchas veces se desechan buenos instrumentos por no usárselos adecuadamente.

- Técnicas de Medición Precisa de Tiempo

Afortunadamente hay técnicas alternativas que pueden suministrar mediciones de tiempo precisas.

Las mas populares para mejorar la resolución son: *“la promediación de intervalo de tiempo”, “la interpolación analógica y los osciladores escalables”*.

- ❖ La **Promediación Analógica** del intervalo de tiempo está basada en el hecho que si la cuenta de error es $\pm y$ aleatoria, ella puede reducirse cuando un cierto número de mediciones pueda promediarse. Para esto, el intervalo a medir debe ser repetitivo y tener una frecuencia de repetición que es sincrónica con la señal interna del reloj del instrumento.

En estas condiciones entonces se tiene una resolución de:

$$\text{Resolución del intervalo de tiempo promedio} = \pm \frac{\text{cuenta}}{\sqrt{N}}$$

Donde N es el numero de intervalos de promediados y ± 1 cuenta es el limite de resolución de una medición.

La mejora absoluta de la resolución esta limitada sólo por el ruido inherente al instrumento y debe ser menor a 100 picosegundos.

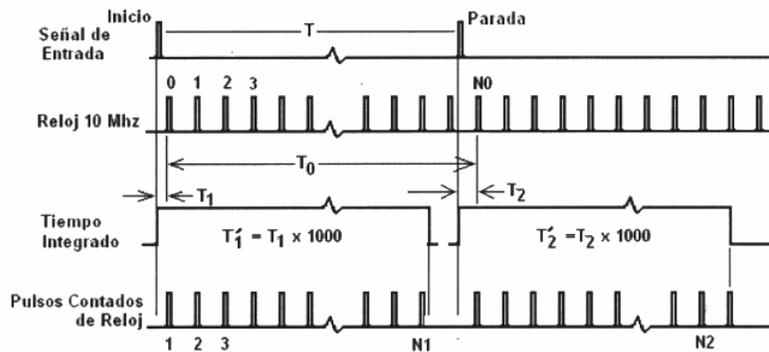
La mayor ventaja de la medición promedio de intervalo de tiempo es costo relativamente bajo el cual, la alta resolución es conseguida.

La desventaja es que se requiere una señal repetitiva y a veces se requieren mucho tiempo para tomar las N mediciones necesitadas. Además, las mediciones estadísticas adicionales, como son valores pico a pico, el jitter RMS o histogramas no podrán hacerse porque son anuladas por la promediación.

- ❖ A diferencia de la técnica de promediación, la **Interpolación Analítica** mide la indeterminación de ± 1 cuenta, quedando el intervalo T a medir como:

$$T = T_0 + T_1 - T_2$$

Donde T_0 es el intervalo de tiempo entre el primer pulso de reloj posterior al pulso de reloj posterior al pulso de inicio y el primer pulso de reloj posterior al pulso de fin, y T_1 y T_2 son los tiempos ambiguos entre el primer pulso de reloj posterior al pulso de inicio o parada, y el pulso de Inicio o el de Parada respectivamente.



Para medir el intervalo T_1 , un capacitor es cargado durante este tiempo y luego descargado a una tasa 1000 veces menor durante el tiempo de descarga; los pulsos de reloj que caen dentro de este tiempo son contados, resultando en N_1 cuentas.

El intervalo T_2 es medido en forma similar, resultando en N_2 cuentas.

Figura 2: **Por interpolación Analógica se puede lograr una resolución de 100 pseg. con un reloj de 10 MHZ.**

Con T_0 representando por N_0 cuentas que se mide acumulando simplemente los N_0 pulsos de reloj que ocurren durante ese intervalo, y T_1 y T_2 se obtienen intercalando interpoladores analógicos que incrementan 1000 su valor en tiempo, y en consecuencia, el tiempo T resulta:

$$T = \left(\frac{1000 N_0 + N_1 - N_2}{1000} \right) \times \text{Periodo}_{reloj}$$

Donde N_0 es el número de pulsos de reloj contados durante el intervalo T_0 .

N_1 es el número de pulsos de reloj contados durante el intervalo extendido 1000 veces de T_1 , o sea, en el intervalo $T'_1 = 1000 \times T_1$.

N_2 es el número de pulsos de reloj contados durante el intervalo extendido 1000 veces de T_2 , o sea, en el intervalo $T'_2 = 1000 \times T_2$.

La resolución de la medición ha sido incrementada 1000 veces por interpolación y la incertidumbre de ± 1 cuenta se reduce 1000 veces, y el instrumento se comporta como si la frecuencia del reloj fuese 1000 veces mas alta (En este caso la resolución es de ± 2 cuentas debido a las dos interpolaciones).

El dispositivo interpolador de inicio mide el tiempo T_1 , durante el cual se carga un capacitor estable con una corriente constante, y luego se descarga a un régimen 1000 veces menor. El tiempo extendido T'_1 se mide contando los N_1 pulsos de reloj que ocurren durante ese intervalo.

De igual forma se mide el tiempo T_2 con otro interpolador similar, midiéndose los N_2 pulsos de reloj que ocurren durante el intervalo extendido T'_2 .

La exactitud de la medición esta limitada por la estabilidad de la base de tiempo, por la estabilidad el los capacitores y del generador de corriente constante, y de la exactitud de la descarga.

Así la desventaja de la técnica de Promediación es resuelta. La técnica de Interpolación es idealmente adecuada para mediciones de coincidencia.

- ❖ La técnica de Osciladores Escalables es también una técnica de interpolación y ofrece ventajas similares a la Interpolación Analógicas. El proceso es ilustrado en la figura #3 donde un intervalo de 102 ns es medida con una resolución de 1 ns.

Los Osciladores Escalables son usados con esta técnica; uno para iniciar la señal de entrada y el otro para Detenerla. El oscilador de arranque START tiene un periodo de 100 ns mientras que el otro STOP tiene un periodo de 99 ns.

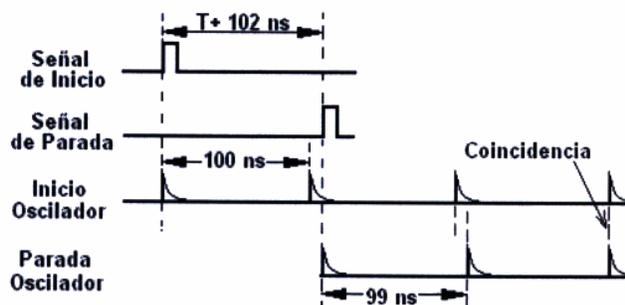


Fig 3: Dos osciladores escalables: uno de Arranque (Inicio) y otro de Parada dan alta resolución.

Al recibir el pulso INICIO (Start), el oscilador START comienza a generar pulsos de 100 nseg que son acumulados en un registro. Tan pronto como el pulso de PARADA (STOP) es recibido, el acumulador se detiene, sin embargo, el oscilador START no deja de generar y al mismo tiempo el Generador STOP comienza a desarrollar pulsos de 99 nseg de periodo, estando la salida de este oscilador conectado a otro registro hasta que haya coincidencia entre los dos trenes de pulsos detectados. Puede deducirse que esto ocurrirá justo dos pulsos mas tarde.

El contenido del registro START contiene la información del intervalo de tiempo con una resolución de 100 nseg, mientras que el registro STOP contiene la restante dos décadas de resolución.

Algunos instrumentos proveen un modo operacional para disparo externo aumentando la versatilidad de la medición, y permitiendo al operador "armar" tanto el pulso de INICIO como el de parada de la medición.

- Circuitos críticos en las mediciones de intervalo de tiempo.

La mayoría de los usuarios de instrumentos de medición de intervalo de tiempo tienen problemas, porque ellos no tienen en cuenta todas las facetas de las entradas de un contador y los circuitos de acondicionamiento de la señal de entrada, así como los errores creados por ellos. Los factores críticos incluyen el **ancho de banda**, el **retardo diferencial**, la **sensibilidad**, el **rango dinámico** y el **nivel de trigger**.

- ❖ **Ancho de Banda.** La señal más rápida que se verá por los amplificadores de entrada esta limitada por el tiempo de subida del amplificador (slew rate). Así, es inútil tratar de medir un tiempo de subida de 10 nseg con un amplificador de 100 nseg de slew rate. Sin embargo la resolución del intervalo de tiempo ofrecido por muchos contadores es mucho mayor al slew rate de los amplificadores. Esto es particularmente cierto donde técnicas especiales se usan para incrementar la resolución, como se dijo anteriormente. Así, muchos instrumentos funcionando correctamente, pueden dar errores debido al ancho de banda de los Amplificadores de entrada. Este error potencial puede minimizarse en muchos casos ajustando los controles de trigger del contador.

Disparando el conteo en las porciones más rápidas (mayor derivada) de la señal de entrada, se minimiza el error de disparo. Ejemplo del efecto del ancho de banda de los amplificadores de entrada se observa en la figura 3, donde "a" es la señal original de entrada y "b" es la señal a la salida del amplificador de entrada.

- ❖ **Retardo Diferencial.** El ancho de banda finito de los amplificadores de entrada implica que hay un retardo de propagación finito de la señal a través del amplificador. Dado que dos o más amplificadores están involucrados en la medición y es virtualmente imposible conseguir perfecto balance entre ellos, existe un diferencial finito en el retardo de propagación entre ambos canales involucrados en la medición de intervalo de tiempo. Esto puede crear errores significativos especialmente donde se usan técnicas para incrementar la resolución. Sin embargo, es relativamente simple calibrar o minimizar ese desfasaje en tiempo entre ambos amplificadores. Para ello se inyecta alternativamente en cada canal, un tren de pulsos de un periodo conocido precisamente, y se mide el intervalo de tiempo entre ambos. Si hay una diferencia apreciable (retardo diferencial), esta se puede eliminar insertando una longitud de cable en el canal mas rápido (menor tiempo medido) que retarde la señal un tiempo igual al retardo entre los dos canales.
- ❖ **Sensibilidad:** La sensibilidad de un contador debe elegirse de modo de manejar el menor nivel de señal de entrada. Excesiva sensibilidad puede crear problemas especialmente con entradas de banda ancha ya que pueden ocurrir disparos de trigger falso en señales con ruido aleatorio o pulsos de ruido que puedan ocurrir.
- ❖ **Rango Dinámico.** El rango lineal de un amplificador de entrada esta referido como rango dinámico. Si las señales de entrada exceden el rango dinámico de un contador habrá distorsión en el mejor de los casos, o se dañará el circuito de entrada en el peor caso. Debe usarse tanta atenuación como sea necesaria para mantener la señal de entrada dentro del rango dinámico. Note que los atenuadores también pueden crear una fuente extra de error, dependiendo de su precisión y además deben ser compensados en frecuencias para evitar distorsión de la señal. También debe tenerse en cuenta que la atenuación decrece la sensibilidad efectiva de entrada. En consecuencia, para máxima flexibilidad, es necesario que el rango dinámico sea lo mas ancho posible. Un rango dinámico de 20 dB mayor a la sensibilidad es considerado medianamente adecuado. Uno de 26 dB es preferible.
- ❖ **Ajuste del Nivel de Trigger.** Para mantener la máxima flexibilidad conseguida por el rango dinámico ancho, el control del nivel de trigger debe permitir al operador disparar el contador en cualquier punto de la señal dentro del rango dinámico.
Los contadores tienen optimizados sus circuitos de entrada para el conteo de frecuencias, detectando los cruces por cero de la señal a medir, por lo cual esto hace que este sea un punto crítico en la exactitud de las mediciones de intervalos de tiempo. O sea, los contadores comerciales tienen pobre habilidad para definir con precisión el punto de disparo en señales de crecimiento lento, ya que estos circuitos de entrada están limitados a medir eventos.

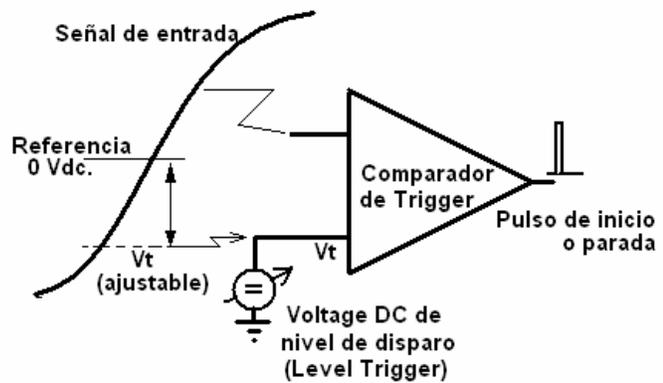
Para algunas mediciones como tiempo de subida, el slew rate y retardo de propagación alrededor del punto del 50 % de la amplitud; la determinación del nivel absoluto de entrada a la cual disparar el conteo es muy importante, y cualquier error en el nivel de disparo se transfiere directamente en el error de medición.

- Determinación del nivel de Disparo.

La técnica popular de determinar el punto de disparo del trigger usaba la modulación del eje Z de un osciloscopio. El inevitable retardo de propagación de la línea de transmisión desde el trigger del contador hasta el circuito de grilla control (control de intensidad) del osciloscopio, sumado a la limitación de la velocidad inherente de esta técnica, la hace impráctica para una medición precisa.

Se ha encontrado, que la mejor opción para determinar en forma precisa el punto (punto de trigger) donde se abre la ventana de conteo, es medir el verdadero nivel de voltaje de continua, " V_t ", a la cual ocurre el punto de disparo. Muchos contadores de precisión cuentan con una salida, que entrega el nivel DC de la tensión de disparo con la cual el comparador interno compara, la señal de entrada para generar el pulso de disparo (inicio y/o parada del contador). Usando una técnica de referencia con la ayuda de un osciloscopio se puede determinar con elevada exactitud cual es el punto exacto de trigger.

En los contadores que tienen este nivel de DC disponible, este nivel es la referencia que permite al comparador de entrada determinar el punto de disparo del contador. Si ese valor de continua es mayor a la cresta positiva, o menor a la cresta negativa, el contador no se dispara y ninguna lectura es indicada en el visor.



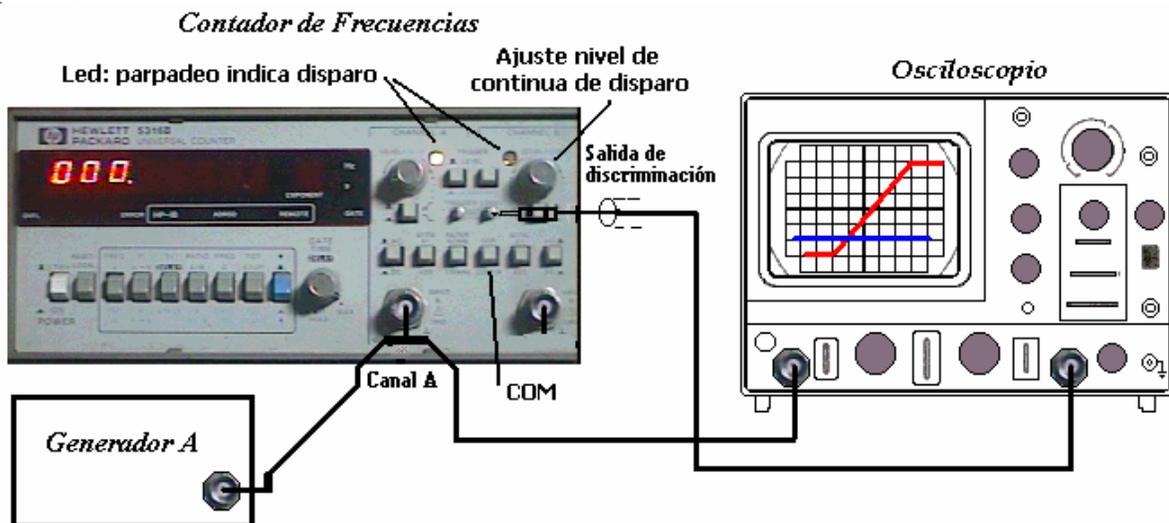
Si el nivel de continua se encuentra entre la cresta negativa y la positiva de la señal a analizar, el contador se dispara desde el momento en que el valor instantáneo de la señal en estudio alcanza dicho valor de continua. Regulando el control LEVEL, se controla el nivel de continua y en consecuencia, el punto de inicio de la cuenta.

Nota: si la salida entregada por el contador fuese un pulso angosto coincidente con el momento de disparo, este pulso se podría inyectar al eje Z de un osciloscopio para indicar en que punto de la señal estamos iniciando la cuenta.

En este caso, al no ser así, hay que diseñar otro procedimiento para determinar en que punto de la señal se inicia la cuenta y en que punto la finaliza, aprovechando los niveles de continua entregada por salidas de referencia del canal (A y B) del contador.

Se observa que cuando el nivel de continua es mayor o menor a la crestas, el Led de disparo deja de parpadear. Cuando hay un disparo, este Led parpadea indicando el inicio de una cuenta.

Aprovechando este indicador, inyectaremos la misma señal ingresada en cada canal del contador, al canal Y(A) de un osciloscopio, y se selecciona el atenuador de entrada para visualizar la máxima deflexión vertical sobre la pantalla.



Luego se inyecta la salida Trigger Level del contador, al canal X (B) del osciloscopio.

Previamente, se ajusta el nivel cero de ambos canales a la línea central de la pantalla, y los dos canales se configuran para Entrada DC.

Luego se ajusta el control Level del contador, en el sentido negativo, justo en el momento en que el led deja de parpadear. En ese punto, se ajusta la ganancia variable del atenuador del canal X hasta lograr que el nivel de continua coincida con la cresta negativa de la señal a analizar.

Luego, se desplaza el control Level del contador en el sentido contrario (disparo positivo) hasta que el led deje de parpadear. El nivel de continua se debería desplazar positivamente hasta el extremo superior de la señal. Si el nivel no coincide con la cresta superior, ajustar alternativamente la ganancia y la posición del canal X para hacer que al variar el control LEVEL del contador, el nivel de continua se desplace entre las dos crestas, usando como indicativo el momento en que el led deja de parpadear.

Ajustar en esas condiciones el Level del contador al punto sobre la señal a medir donde se desea que el contador inicie la cuenta, y no tocar más el control LEVEL del canal A del contador.

Conectar en el osciloscopio la entrada Y(A) al canal B del Contador, y la entrada X(B) a la salida Level Trigger B del contador, y usando igual procedimiento ajustar el osciloscopio y nivel de continua (Level) del contador hasta fijarlo en el punto donde se desea parar la cuenta del contador

Luego de haber calibrado el osciloscopio para visualización de la señal, y del nivel de continua de trigger, se realizan las mediciones deseadas.

- Conclusiones

Para realizar mediciones de tiempo en forma precisa de señales de alta frecuencia o de tiempos del orden de los nanosegundos; no es imprescindible usar equipos muy sofisticados y costosos. Vale tan sólo tener en cuenta las consideraciones necesarias para implementar el montaje adecuado, conocer con precisión los errores que pueden ser generados, su análisis para reducirlos y/o eliminarlos, y activar el ingenio para conseguir mediciones precisas con elementos no tan sofisticados.

El hecho de tener equipos costosos y sofisticados no nos asegura que la medición sea precisa, si no conocemos los errores que se cometen al armar el montaje de medición.

- Bibliografía

Electronic Design - Noviembre 22 de 1974
Mediciones de Intervalo de Tiempo
Hewlett-Packard Counter Notes