

UNIDAD 6: OSCILOSCOPIOS

- *Generalidades - función y tipos de osciloscopios.*
- *El T.R.C. - El sistema de deflexión horizontal, los circuitos de base de tiempo y de disparo (Trigger) - El sistema de deflexión vertical - Sondas de entrada*
- *Osciloscopios especiales - Osciloscopios con doble base de tiempo - Barrido intensificado, y barrido retardado - Osciloscopios analógicos de muestreo.*
- *Osciloscopios digitales y de almacenamiento digital. Tipos de muestreo, muestreo en tiempo real y muestreo secuencial - Base de tiempos y circuito de disparo. Distintos modos de disparo.*
- *Apéndice: Ejemplos de mediciones y análisis de señales con osciloscopios.- Mediciones de fase mediante la figura de Lissajous - Diagramas de ojo - Medición de formas de ondas no senoidales.- Relación entre el tiempo de crecimiento y el ancho de banda - Cuestionario*

Al finalizar el estudio de esta Unidad Ud. será capaz de:

- Describir el principio de funcionamiento de los distintos tipos de osciloscopios que se emplean en la actualidad (Analógicos y Digitales). Interpretar las especificaciones de un osciloscopio y con ayuda del correspondiente manual, operar un instrumento de este tipo para analizar señales y efectuar mediciones.

Osciloscopios (Generalidades)

El osciloscopio es uno de los equipos que más se suele utilizar en un taller o laboratorio, ya sea para efectuar experiencias con propósitos educativos, o cualquier otro tipo de trabajo relacionado con la electrónica. Básicamente es un instrumento que permite obtener representaciones visuales de señales (tensiones) en el dominio del tiempo. Es muy probable que el estudiante, a esta altura de su carrera, ya posea algún grado de conocimiento y/o experiencia adquirida en el manejo de un osciloscopio. Esta será muy útil y facilitará la comprensión del principio de funcionamiento de los mismos.

Función y tipos de osciloscopios

La función de los osciloscopios es capturar y dar una representación visual de una señal (tensión), para permitir su análisis en el dominio del tiempo. Los osciloscopios clásicos (analógicos) utilizan, como pantalla para la visualización, un tubo de rayos catódicos (TRC), el cual es un dispositivo que consiste en un tubo de vacío con elementos de enfoque para producir un fino haz de electrones, que se dirige hacia una pantalla fosforescente de manera de generar un punto luminoso cuyo diámetro es de unos 0,3mm, y al que se dota de un sistema dinámico para la deflexión del haz en las direcciones vertical y horizontal. En los osciloscopios más modernos se emplean pantalla de estado sólido.

Como sistema de representación es un trazador X-Y donde la ordenada del punto en la pantalla se corresponde con la amplitud de la señal a estudiar, y la abscisa, o bien es proporcional al intervalo de tiempo transcurrido desde un punto de referencia, o bien se corresponde también con la amplitud de otra señal a estudiar.

Los movimientos del punto luminoso en las direcciones X e Y son independientes uno del otro. El origen de coordenadas se suele situar en el centro de la pantalla y los cuadrantes se designan del mismo modo que en trigonometría.

Además de servir para detectar la presencia o no de señal, y la visualización de formas de ondas complejas (o secuencias de niveles en un circuito digital), los osciloscopios permiten realizar otras medidas básicas como por ejemplo; frecuencia, diferencia de fase, tiempos de subida y de bajada, ancho de pulsos etc; todas estas, relacionadas con tensiones. Para medir otras magnitudes físicas que no sean tensiones hay que emplear transductores.

La clasificación de los distintos tipos de osciloscopios se puede hacer siguiendo varios criterios:

- De acuerdo con la máxima frecuencia admisible en el canal vertical se los puede dividir en "Osciloscopios de baja Frecuencia" (hasta unos 20 MHz) y de "Alta frecuencia" (hasta unos 500 MHz). Para frecuencias superiores a 1 GHz se usan las técnicas de muestreo que no representa la señal en tiempo real.
- Según el número de canales verticales se distinguen por un lado los osciloscopios que solo tienen uno y por otro los que tienen dos o mas. Entre los osciloscopios de dos o mas canales se pueden diferenciar a su vez según la técnica usada para producir dos imágenes simultáneas, ya que hay modelos con "doble cañón", (cada uno con sus sistemas de deflexión vertical y horizontal por separado); "de doble haz" (que poseen un único cañón con su sistema de deflexión horizontal pero dos sistemas de deflexión vertical); y finalmente los mas comunes de "doble trazo", en los cuales con un único cañón y sistemas de deflexión, se consigue aparentar una imagen doble representando en forma alternada cada canal y usando la propiedad de persistencia de la imagen para disimular el efecto.
- Un aspecto adicional para la clasificación, es si el osciloscopio dispone de alguna posibilidad de memorizar la presentación obtenida. Antiguamente se empleaban diversos tipos de pantallas (TRC) con ciertos grados de persistencia, lo que permitía retener la forma de onda de la señal durante un tiempo muy largo para su mejor análisis. Modernamente existen osciloscopios que producen el mismo efecto pero gracias a una digitalización de la imagen en vez de una pantalla especial; son los denominados de "Osciloscopios Digitales". (En realidad, prácticamente todo osciloscopio digital es, por razones inherentes a su concepción, un "Osciloscopio de almacenamiento digital").

Hay además otros instrumentos electrónicos basados en el TRC que trabajan en el dominio del tiempo. Los llamados analizadores lógicos de tiempo son básicamente osciloscopios de varios canales (de 16 a 64) preparados para observar simultáneamente varias señales digitales (Trenes de ceros y unos). Los trazadores de curvas para semiconductores son analizadores que representan la respuesta de dichos dispositivos cuando son excitados por señales que se generan en el mismo instrumento. Otros equipos que usan el TRC pero que no trabajan en el dominio temporal, son los analizadores de espectros, en los cuales el eje horizontal se corresponde con la frecuencia.

Osciloscopios analógicos de usos generales.

El instrumento que podemos encontrar habitualmente en un laboratorio básico de electrónica suele ser un osciloscopio analógico, de doble trazo, de baja frecuencia, y de propósitos generales. En esta sección se analizará el principio de funcionamiento y las principales características y especificaciones de este tipo de osciloscopios.

Como ya se ha dicho, un osciloscopio está constituido básicamente por un TRC y los sistemas de deflexión vertical y horizontal necesarios para posicionar el haz en el punto correspondiente. Algunas partes del tubo necesitan una alimentación de alta tensión continua perfectamente estabilizada mientras que otras y el resto de los circuitos emplean tensiones bajas.

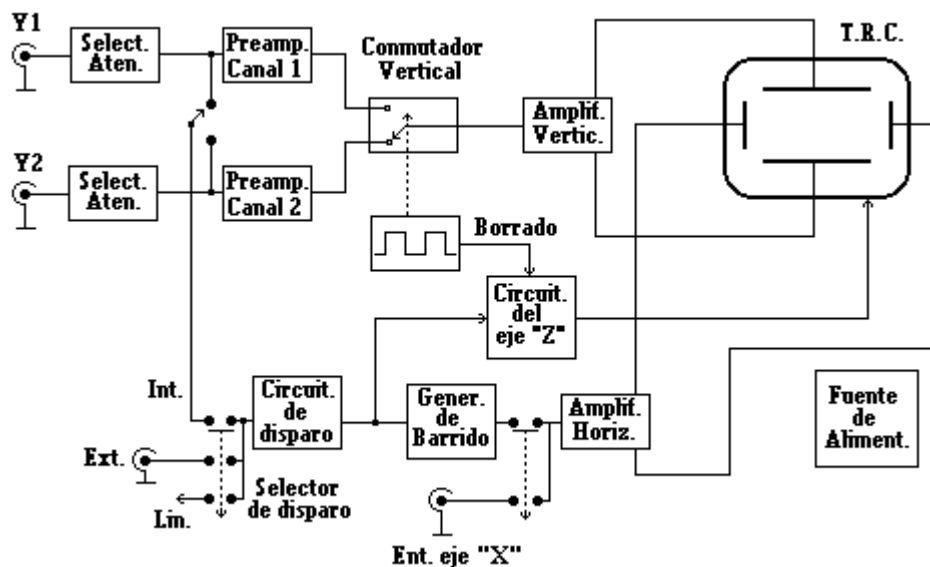


Fig. 6-1 (Diagrama en bloques de un osciloscopio de doble trazo)

Como puede verse en este dibujo, en un osciloscopio pueden reconocerse tres bloques o circuitos principales:

I) En el tubo se generan electrones que mediante un sistema de enfoque forman un haz muy fino, al mismo se le imprime una alta velocidad mediante un sistema de aceleración y se lo dirige hacia la pantalla que interiormente está cubierta de un material fosforescente.

II) El sistema de deflexión horizontal está constituido por dos placas metálicas dispuestas en el interior del tubo, a las que se aplica o bien la señal **X** o bien una tensión en forma de rampa (tensión de barrido), relacionada con la señal de uno de los dos canales de entrada, y obtenida mediante un circuito denominado de "Base de tiempos", el cual consta de:

- Un circuito de disparo (trigger) que hace que el barrido se inicie siempre en el mismo punto de modo que si la señal de entrada es repetitiva se obtenga una representación persistente. Mientras dura un barrido no se produce otro disparo.
- Un generador de barrido que produce una señal con forma de diente de sierra y pendiente positiva muy lineal y controlable desde el panel del instrumento.
- Un amplificador horizontal que al igual que el amplificador vertical proporciona una salida a modo diferencial para aplicar a las dos placas a partir de la señal suministrada por el generador de barrido que está referida a masa. De esta forma se consigue que el haz pueda moverse a lo ancho de la pantalla y de izquierda a derecha de la misma.

- Un amplificador del eje **Z** que suministra una tensión mientras se hace el barrido horizontal, y se anula en los demás casos. De este modo se suprime el Haz cuando el mismo debe volver a la izquierda de la pantalla una vez terminado el barrido y mientras se espera el próximo disparo.

III) En el sistema de deflexión vertical el haz pasa entre otro par de placas ubicadas en el interior del tubo a las que se aplica la señal correspondiente a los ejes Y1 e Y2 (en forma alternada o troceada, según se vera un poco mas adelante) lo cual produce su desviación. Estas placas están conectadas a un amplificador de deflexión que produce una señal diferencial a partir de las señales de entrada de ambos canales que generalmente están referidas a masa. La respuesta en frecuencia del osciloscopio esta directamente ligada a la respuesta del amplificador de deflexión vertical y sus etapas previas.

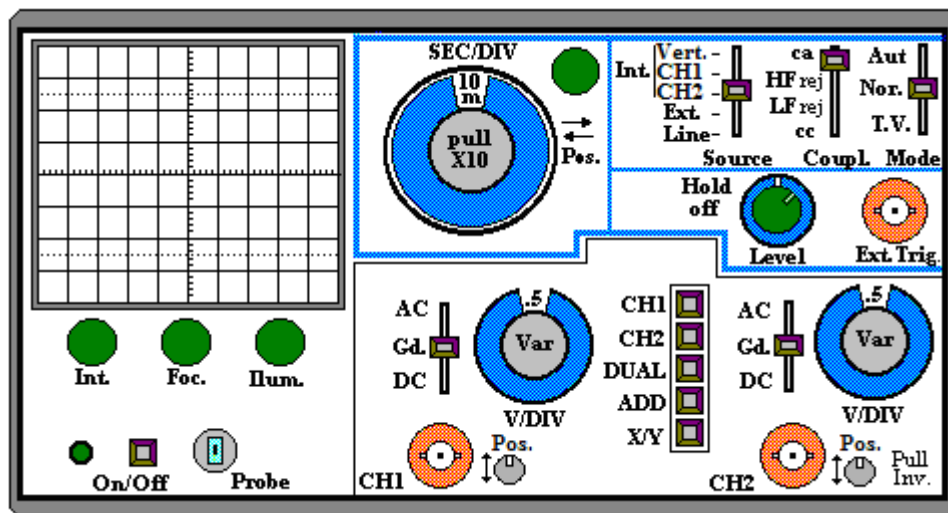


Fig. 6-2. Esquema del panel de controles de un osciloscopio de usos generales típico.

En la Figura 6-2 se puede apreciar la disposición clásica de los controles y mandos en el panel frontal de un osciloscopio. Generalmente el panel se encuentra dividido en tres sectores (además del espacio ocupado por la pantalla). En cada uno de estos sectores se ubican los controles que actúan sobre cada uno de los bloques principales. La función de cada control se irá comprendiendo más o menos a medida que se avance en el estudio de la presente unidad. Será necesario, sin embargo, complementar este estudio con algunas horas de trabajo en el laboratorio para lograr una correcta comprensión del tema.

A continuación se explicara con más detalle las características de cada uno de estos tres bloques principales.

Tubo de rayos catódicos (TRC)

Los tubos de rayos catódicos que se usan en los osciloscopios, son básicamente similares a los que se utilizan en los receptores de televisión domésticos, pero a diferencia de estos, en los cuales la deflexión del haz se consigue por medio de un par de bobinas (deflexión magnética) colocadas en forma externa en el cuello de la ampolla de vidrio del tubo, en los TRC de los osciloscopios se usa deflexión electrostática mediante placas metálicas

dispuestas en el interior del tubo. La razón de tal diferencia es que debido a que las exigencias en cuanto a la linealidad de barrido, y la respuesta en frecuencia, obligaría, en el caso de usarse deflexión magnética, a disponer de bobinas de reducida inductancia, y por consiguiente elevadas corrientes a través de las mismas complicándose el diseño de los respectivos amplificadores. En cambio al usar tensiones en lugar de corrientes, es más fácil generar y amplificar las formas de ondas que se manejan sin producir excesivas distorsiones. Como contrapartida, la deflexión magnética permite un mayor ángulo de deflexión, por lo cual los tubos que la usan son más cortos que anchos a la inversa de los tubos que usan deflexión electrostática.

Se pueden distinguir en un TRC tres partes principales.

1) **EL cañón electrónico**; es la parte donde se genera el haz y consta de un cátodo, una grilla de control y un ánodo; hay además una serie de electrodos de enfoque encargados de hacer converger los electrones del haz en un punto único y lo mas pequeño posible sobre la pantalla, esto es necesario ya que naturalmente el haz tiende a abrirse debido a la repulsión entre los propios electrones.

- El Cátodo es termoiónico, y emite electrones al ser calentado por un filamento. Consiste generalmente en un cilindro de níquel que lleva un revestimiento de óxidos de bario y estroncio en la punta.
- La grilla de control, es un cilindro de níquel que rodea totalmente al cátodo, con una pequeña abertura en la zona del eje del tubo. Esta polarizada negativamente con respecto al cátodo y su tensión controla el ritmo de emisión de electrones determinando así la intensidad del haz. El amplificador del eje Z, es el que controla la corriente del haz. Hay además un control externo ubicado en el panel del instrumento para ajustar el brillo de la imagen al valor deseado.
- El ánodo es un juego de electrodos (Suelen ser por lo general dos, el primer ánodo y el segundo ánodo) que también tiene forma cilíndrica y posee una abertura alineada con la de la grilla para permitir que el haz emerja del mismo. Esta polarizado con una tensión positiva respecto del cátodo, y de varios miles de volts de manera de producir una aceleración considerable sobre el haz. Entre medio de los dos electrodos principales del ánodo, se ubican los electrodos de enfoque.

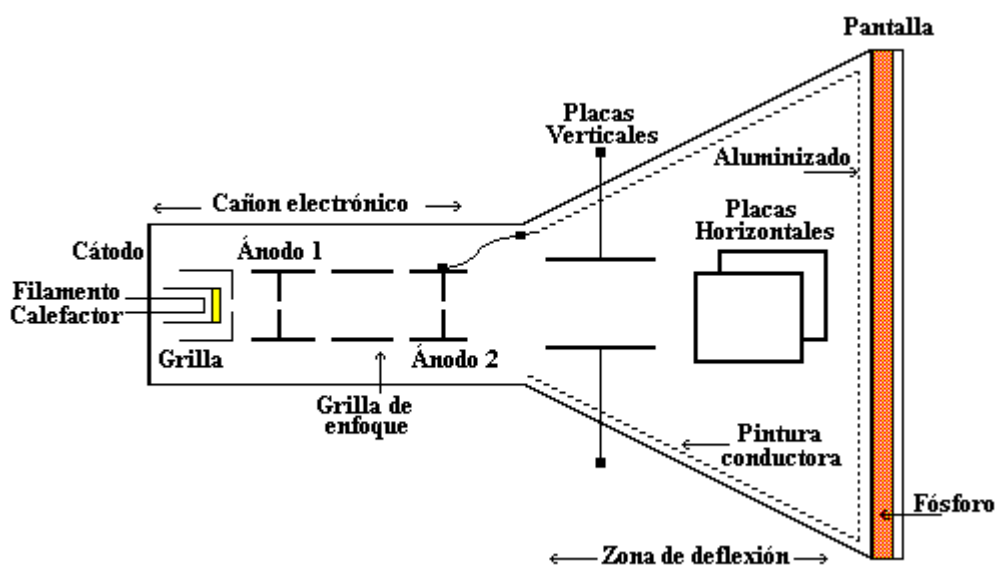


Fig. 6-3 Esquema de un TRC con sus principales elementos

El enfoque se consigue aplicando distintas tensiones entre el primer y segundo ánodo y el o los electrodos de enfoque propiamente dichos. Se forma así una zona de espacio donde el potencial esta distribuido de manera de crear una lente electrostática. La acción de esta lente se basa en el principio de que las fuerzas que actúan sobre un electrón que se mueve en un campo eléctrico, son perpendiculares a las líneas de igual potencial y en el sentido de los potenciales crecientes.

En la Figura 6-4 se muestra el diagrama de un sistema de enfoque sencillo. Como puede verse el haz emerge del primer ánodo siendo levemente divergente, en cambio a la salida del segundo ánodo el haz se torna convergente.

El punto de enfoque y la forma del punto sobre la pantalla se pueden variar ajustando las tensiones relativas de unos electrodos respecto de los otros. El tamaño del punto sobre la pantalla se determina con el control de FOCO, que generalmente se dispone en el panel frontal, mientras que la redondez del punto se ajusta actuando sobre el control de ASTIGMATISMO, que no siempre es accesible desde el exterior. Estos dos controles suelen ser interdependientes, pero no afectan al control de intensidad del haz.

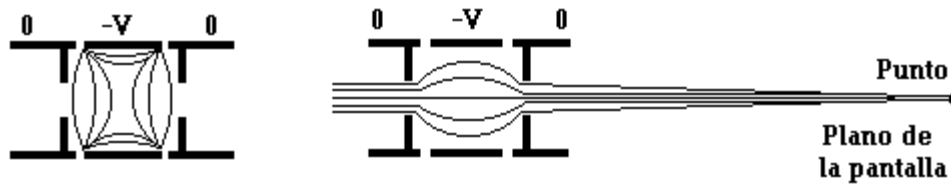


Fig. 6-4 Sistema de enfoque y lente electrostática

Para situar el eje X horizontalmente se suele disponer del control de ALINEACIÓN, mientras que la perpendicularidad X-Y se regula con el control de ORTOGONALIDAD. Para estos controles se emplean bobinas externas a la ampolla del tubo. Estos controles suelen ser internos y su uso es infrecuente. Pueden hacer falta, por ejemplo, si se esta trabajando cerca de un campo magnético intenso.

2) Placas de deflexión. Para que el haz de electrones incida sobre el punto de la pantalla adecuado de acuerdo con la señal a representar, en los osciloscopios se emplea un sistema de deflexión electrostática basado en unas placas metálicas dispuestas en el interior del tubo. Hay dos placas de deflexión horizontal y otras dos para la deflexión vertical.

El funcionamiento del sistema puede comprenderse si se examina la trayectoria de un electrón que atraviesa el campo eléctrico uniforme creado por dos placas paralelas. Esta trayectoria es parabólica y viene dada por la expresión:

$$y = \frac{V_d}{4 \cdot d \cdot V_a} \cdot z^2$$

Donde V_a es la tensión de aceleración (ánodo - cátodo) que le ha dado al electrón su velocidad al entrar en la región de las placas. Al salir de dicha región no hay campo eléctrico en la dirección "y"; en consecuencia el mismo continua con su trayectoria rectilínea tangente a la curva en el punto de salida. Su pendiente será:

$$\tan \theta = \left. \frac{dy}{dz} \right|_{z=ld} = \frac{V_d \cdot ld}{2 \cdot d \cdot V_a}$$

El origen aparente de esta recta esta en el centro de la zona de deflexión (en medio de las placas). La deflexión " D ", en la pantalla será entonces:

$$D = L \cdot \tan \theta = L \frac{V_d \cdot l_d}{2 \cdot d \cdot V_a}$$

Obsérvese que " D " es directamente proporcional a la tensión de deflexión V_d y por tanto, el TRC puede usarse como dispositivo lineal de representación de tensiones.

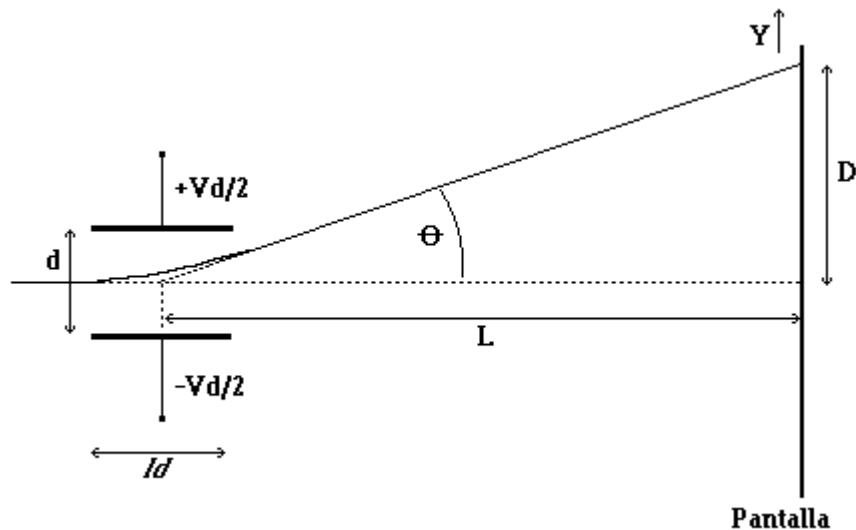


Fig. 6-5 Deflexión electrostática

Para poder comparar los diversos TRC se emplea el "Factor de deflexión" (FD), definido como la tensión diferencial necesaria para mover el haz una división de la pantalla:

$$FD = V_d/D = 2d \cdot V_a/L \cdot l_d$$

El valor de FD se reduce al aumentar la longitud del tubo y al reducir la tensión de aceleración. Pero esta debe ser suficientemente alta para que se tenga un brillo adecuado, incluso para velocidades de barrido altas. Suele ser entre 10 y 100 V/cm, y en un tubo bien diseñado debe ser constante para cualquier punto de la pantalla.

Las placas de deflexión vertical son las que primero actúan sobre el haz para que así puedan trabajar con tensiones menores, ya que se desconoce la magnitud de la señal que va a manejar. En cambio como el amplificador horizontal maneja habitualmente la señal de barrido que es conocida de antemano se las ubica posteriormente y más cerca de la pantalla. Generalmente como la pantalla tiene más divisiones en sentido horizontal que vertical se necesita que la deflexión horizontal sea mayor.

En los tubos para osciloscopios de baja frecuencia (hasta unos 20 MHz) la descripción previa se ajusta bastante a la realidad. Para tubos de osciloscopios de frecuencia mas elevadas, se suele dotar a los mismos con otros elementos extras como son los sistemas de post aceleración, y las placas de deflexión segmentadas.

A fin de que el único efecto producido por las placa de deflexión sobre el haz sea justamente la deflexión del mismo, es necesario que el valor promedio de las tensiones que

se aplican a las placas sea igual al del ánodo, de manera que en la mayoría de los TRC se opta por alimentar el ánodo y las placas de deflexión, con tensiones reducidas (a masa o a lo sumo del orden de las decenas de volts) y el cátodo con un alta tensión negativa. Por esta razón, el circuito que alimenta el filamento nunca se conecta a masa y si en cambio debe estar conectado de manera que la diferencia de potencial entre el mismo y el cátodo sea lo mas baja posible.

El interior de la ampolla en la zona de deflexión y hacia la pantalla, se encuentra cubierto de una pintura conductora conectada al potencial del ultimo ánodo cuyo propósito es absorber los posibles electrones secundarios que se desprenden del fósforo de la pantalla al incidir sobre la misma el haz. Además, hace de apantallamiento electrostático frente a campos externos y uniformiza el campo eléctrico dentro del tubo.

3) Pantalla y graticula. La pantalla esta recubierta internamente de un compuesto a base de fósforo, que es una sustancia que convierte la energía cinética de los electrones en luz. La elección del tipo de fósforo se hace teniendo en cuenta la persistencia, color, resistencia al quemado (solo un 10% de la energía del haz se convierte en luz, el resto genera calor), luminosidad y velocidad de escritura permitida (esta ultima viene dada por la demora entre el instante de producido el impacto del haz y el momento en que se produce la emisión efectiva de luz). En los osciloscopios comunes, el compuesto mas usado es el denominado P31, que emite luz verde. En algunos modelos recientes se ha comenzado a introducir la modalidad de varios colores simultáneamente.

En el lado interno el fósforo se deposita una capa de aluminio suficientemente fina como para que sea transparente a los electrones. Con ella se logra: evitar la acumulación de cargas en el fósforo que limitaría el brillo al crear un campo eléctrico negativo y frenar los electrones siguientes; reducir la dispersión de luz, reflejando la misma hacia el frente de la pantalla; y disipar el calor reduciendo el peligro de quemado.

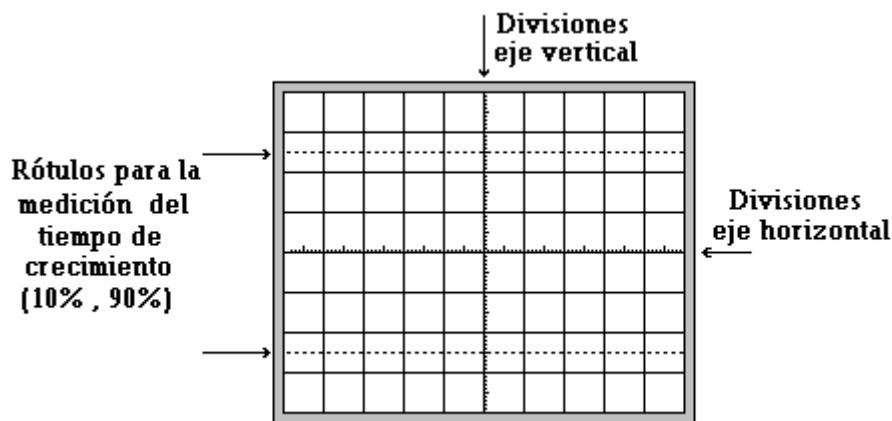


Fig. 6-6 Graticula con rótulos en la pantalla de un osciloscopio.

La graticula es el conjunto de marcas horizontales y verticales que facilitan el análisis de la señal y permiten calibrar la deflexión del haz. Normalmente hay 10 divisiones horizontales y 8 verticales, con iguales dimensiones. La graticula puede ser externa al tubo (adossada a la parte frontal, o interna, en cuyo caso el fósforo y la graticula se depositan en el mismo plano. Para evitar el deslumbramiento, y como medida de seguridad, delante de la pantalla se suele disponer una placa frontal de un plástico apropiado. Algunos osciloscopios incluyen una iluminación exterior de la graticula controlable desde el panel.

Sistema de deflexión horizontal

La función del sistema de deflexión horizontal es desplazar a velocidad constante (es decir linealmente) el trazo de izquierda a derecha de la pantalla, representando el eje de tiempos, o bien representar fielmente una señal de entrada (modo X-Y, figuras de Lissajous). El conjunto del generador de barrido y el circuito de disparo del mismo constituye la denominada "Base de tiempos" del osciloscopio. En la Figura 6- 7, se muestra el diagrama en bloques de un circuito de base de tiempos.

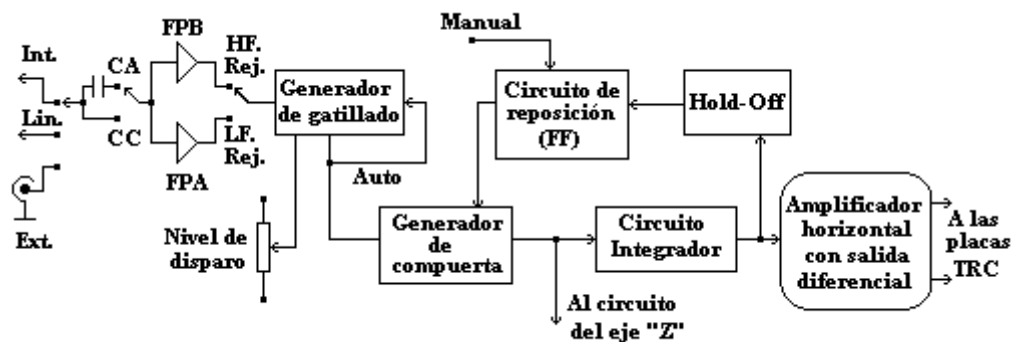


Fig. 6-7 Estructura de un sistema de deflexión horizontal de osciloscopio

El generador de barrido produce una señal en forma de diente de sierra, con una rampa de tensión que desplaza el haz hacia la derecha de la pantalla y una caída brusca que provoca el rápido retorno del haz hacia la izquierda, durante la cual se suprime el mismo (borrado).

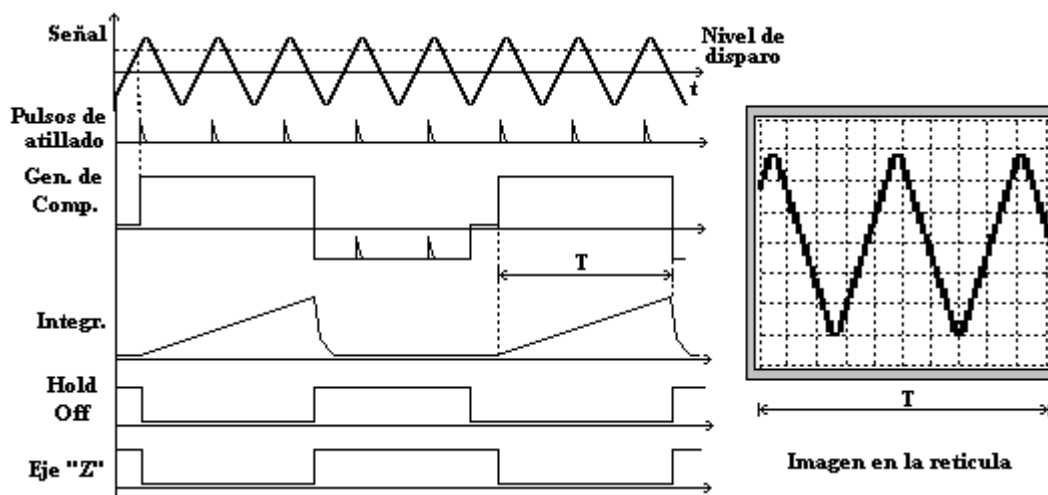


Fig. 6-8 Diagramas de tiempo de un circuito de base de tiempos.

La rampa de subida se consigue generalmente cargando un condensador con una corriente constante en un circuito integrador, convirtiendo así un escalón de entrada en un diente de sierra. La constante de tiempo del circuito viene determinada en su forma mas simple por un condensador que se conmuta mediante el selector ubicado en el panel

(**TIEMPO/DIVISIONES**), y una resistencia, parte de la cual es variable en forma continua para ajustar el tiempo de barrido entre los pasos calibrados.

Las velocidades de barrido dependen del ancho de banda del osciloscopio, pero para instrumentos de baja frecuencia (hasta 20 MHz.) pueden ir típicamente de 200 ps/división hasta 5 s/div, en una secuencia de 1-2-5-10. Suele haber además un **MULTIPLICADOR** con variación continua, o en dos saltos de 5 y 10, que permite tener una velocidad de barrido mayor con ajuste continuo.

Circuito de disparo (Trigger)

Los circuitos de disparo son necesarios para conseguir una presentación adecuada en la pantalla. Si no existieran, solo se lograría una imagen estable cuando el tiempo de duración de la rampa, mas el de retención fueran un submúltiplo exacto del periodo de la señal a presentar. En los párrafos que siguen se describe el funcionamiento del disparo de un osciloscopio básico. Las funciones del circuito de disparo que suelen estar un poco mas desarrolladas en instrumentos mas avanzados serán estudiadas un poco mas adelante.

Fuentes de disparo.

El disparo de la base de tiempos se hace mediante el empleo de un impulso que activa el circuito integrador del generador de barrido. Normalmente el impulso de disparo se origina a partir de la comparación de un nivel de tensión, que se ajusta desde el panel, con la pendiente de la señal que se emplea como fuente de disparo, esto se conoce como “*modo de disparo por pendiente*”.

La fuente de disparo, es una señal determinada que se elige mediante un control al efecto en el panel, y como regla general en todo los osciloscopios se emplean alguna de las siguientes modalidades:

- **Disparo interno:** Se deriva de uno de los dos canales y en el modo dual se selecciona mediante una llave manual, o bien de manera automática en forma alternada (comúnmente denominada “*Fuente Vertical*”), aunque de esta manera se pierde la referencia de fase relativa entre las dos señales visualizadas. Generalmente, como la señal de disparo interna se toma después del atenuador o del preamplificador, resulta que los controles verticales pueden afectar al disparo dependiendo de su posición, por ende el umbral de disparo interno suele venir indicado directamente en número de divisiones verticales en la pantalla en lugar de nivel de la señal de entrada.
- **Disparo externo:** En este caso el disparo se hace mediante una señal que se aplica en una clavija que se encuentra en el panel del instrumento, y es independientemente de la posición de todos los controles verticales. Su umbral se indica directamente en niveles de tensión, (por ejemplo 100 mV) y en algunos casos, se suele disponer de un atenuador para regular el nivel de la señal. Se utiliza principalmente cuando la amplitud de la señal que se desea analizar sufre variaciones de amplitud, lo que, de emplearse el disparo interno, tornaría inestable la base de tiempos.
- **Disparo por línea:** Se emplea una muestra de la señal de la red (50/60Hz) mediante una derivación del transformador de la fuente de alimentación. Permite analizar interferencias producidas por la red o sintonizar un circuito a dicha frecuencia y sus múltiplos.

Modos de acoplamiento y selección de pendiente de disparo.

El selector de disparo determina el modo de acoplamiento de la señal de disparo (CC o CA) y la pendiente elegida (positiva o negativa). Si la señal a visualizar no es simétrica, puede interesar el disparo con una u otra pendiente, ya que conviene poner siempre el nivel de disparo en el punto de máxima pendiente (para evitar los efectos del ruido).

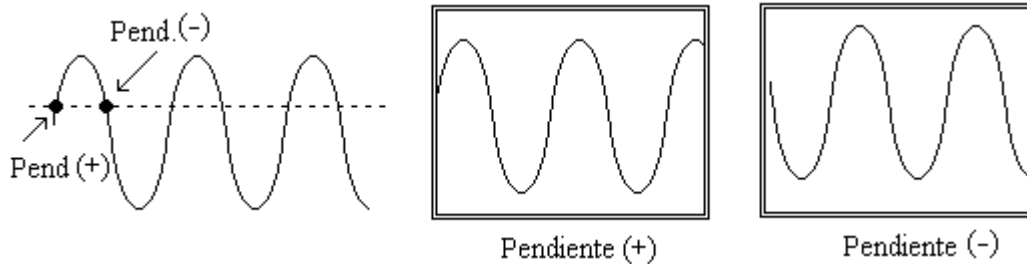


Figura 6-9 Efecto del cambio de la pendiente del disparo

El control de nivel de disparo permite seleccionar el punto de inicio del barrido. Consiste generalmente en un comparador donde una entrada corresponde a la señal y la otra a un nivel de tensión continua.

El modo de disparo se refiere a la repetición de los barridos. En modo NORMAL el punto de disparo viene determinado por el NIVEL dispuesto, y no hay barrido hasta que se alcanza dicho nivel; por ello puede darse el caso de que en ausencia de señal no se produzca nunca el barrido y no aparezca nunca el trazo. En el modo AUTOMÁTICO, si al cabo de un tiempo fijo después del último disparo no se ha producido otro, se inician libremente barridos sucesivos con el propósito de que aparezca una línea de referencia.

Cuando se está ante la presencia de señales que contienen superpuestas otras de mayor o menor frecuencia, pueden producirse efectos de temblequeo (*Jitter*) de la imagen debido a variaciones del punto de disparo. La mayoría de los osciloscopios incluyen, para atenuar este inconveniente, una serie de filtros a la entrada de los circuitos de disparo que permiten rechazar las frecuencias indeseables; dichos filtros se seleccionan por medio de una llave en el panel con las posiciones "Rechazo de alta frecuencia" y "Rechazo de baja frecuencia". En instrumentos que se usan para trabajar con señales de video, se suele disponer también de filtros ajustados para las frecuencias de barrido horizontal (TV-H) o de barrido vertical (TV-V); esto es lo que se conoce como "*disparo por video*".

Finalmente, algunos osciloscopios incluyen el modo de disparo **SINGLE** (disparo único), en el cual después de un barrido, no se aceptan nuevos impulsos de disparo hasta que se haya pulsado un control al efecto (RESET). Este modo es particularmente útil cuando se desean visualizar fenómenos no repetitivos o para tomar fotografías de la imagen.

Disparo con retención de la base de tiempos (Hold off).

Una vez acabado el barrido, no conviene que se produzca otro antes de que el condensador del integrador se haya descargado completamente, por lo cual suele haber un tiempo de demora mínimo entre la finalización de un barrido y el próximo. En algunos osciloscopios, este tiempo de demora, o retención de la base de tiempos, puede hacerse variable y ajustable desde el panel (**HOLD-OFF**), y el margen de variación de este tiempo queda establecido internamente en consonancia con la duración del barrido elegida. El Hold-off es

particularmente útil en los casos de visualización de una forma de onda compleja formada por varias partes distintas o en la cual una parte de la misma no es repetitiva, lo que podría alterar el instante de disparo. Lógicamente en una situación como esta podría recurrirse también al control de ajuste fino de T/Div, pero esto hace perder la calibración del eje de tiempos. Con el Hold-off se ajusta la duración total del ciclo de presentación, manteniendo calibrado el tiempo de barrido.

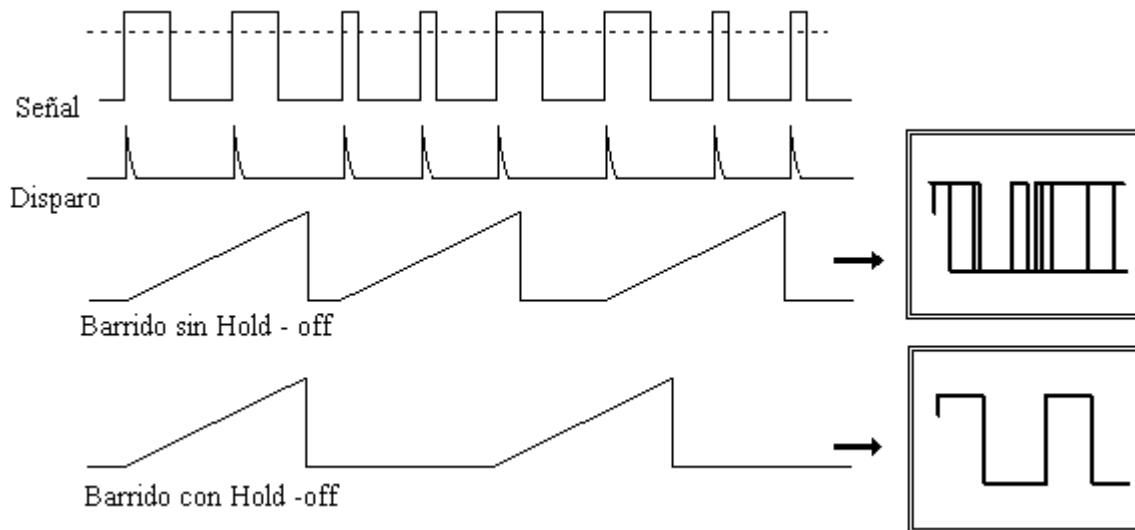


Figura 6-10 Empleo del Hold off para visualizar partes de una forma de onda compleja.

La existencia de los circuitos de tiempo de retención implica que el osciloscopio no muestra la evolución de la señal en forma totalmente continua. Mas bien puede compararse al mismo con un proyector de diapositivas que exhibe fragmentos de dicha señal uno a continuación del otro y en forma superpuestas.

Amplificador horizontal (Eje X).

El amplificador horizontal es el encargado de suministrar a las placas de deflexión la señal diferencial con la amplitud necesaria para producir el barrido.

Dado que solo debe procesar señales en forma de diente de sierra, con amplitud constante y frecuencia relativamente baja, las exigencias de diseño en cuanto a la ganancia y el ancho de banda son menores para el amplificador de deflexión horizontal que para el amplificador vertical. Este detalle debe ser muy tenido en cuenta a la hora de la elección de un osciloscopio, particularmente si se lo va a utilizar como graficador X-Y, pues resulta que en la mayoría de los casos, las características de respuesta en frecuencia de los canales verticales y el horizontal son distintas.

Los dos controles principales que actúan sobre el amplificador horizontal y que están accesibles para el usuario desde el panel del instrumento son: el de **MAGNIFICACION**, que actúa sobre la ganancia y permite una expansión de la señal en dirección horizontal sin necesidad de cambiar el punto de disparo, lo cual facilita el estudio de fragmentos de toda la onda visualizada (Aunque su uso disminuye el brillo del trazo); y el de **POSICIÓN HORIZONTAL**, que se consigue sumando un nivel de tensión continua a la señal de la

base de tiempos. Este control generalmente esta situado antes de la etapa donde se varía la ganancia con el magnificador.

Sistema de Deflexión vertical

La función del sistema de deflexión vertical de un osciloscopio es la de reproducir la señal de entrada fielmente sin alterar en lo posible ni su amplitud ni su forma. Normalmente el diseño se hace buscando una respuesta en frecuencia lo mas plana posible dentro del margen dado por el ancho de banda previsto, y una baja distorsión en la reproducción de pulsos rápidos (respuesta temporal optima).

Por razones que se justificaran mas adelante, (véase el apéndice al final de esta unidad) la relación entre la respuesta temporal (que se especifica bajo el titulo "tiempo de crecimiento", o de "subida") y el ancho de banda viene dada por la siguiente expresión:

$$T_c = \frac{0,35}{\text{Ancho de banda}}$$

Así, por ejemplo, en un osciloscopio de 10 MHz de ancho de banda, el tiempo de crecimiento es de 35 nS.

Si se pretende medir el tiempo de subida de un pulso rápido con un osciloscopio, hay que tener en cuenta el propio tiempo de crecimiento del instrumento. Cuando ambos tiempos son comparables (como máximo uno triple del otro) se puede aceptar que el tiempo de crecimiento final es la suma cuadrática del de la señal y el del osciloscopio, por lo tanto el T_c de la señal será:

$$T_c(s) = \sqrt{T_c(\text{med})^2 - T_c(\text{osc})^2}$$

Si la relación entre el tiempo de crecimiento que se espera medir y el del osciloscopio supera las seis veces, prácticamente no se introduce error apreciable.

La estructura de un sistema de deflexión vertical de un osciloscopio de doble trazo se muestra en el diagrama en bloques de la Figura 6-11. Como puede verse, el amplificador de entrada con su selector y atenuador, se encuentra duplicado exactamente, uno para cada canal (**Y1** e **Y2**). La función del selector de entrada es optar por un acoplamiento en **CC** o en **CA** de la señal de entrada; esta última es útil cuando se desea por ejemplo efectuar la medición del riple superpuesto a una tensión continua. La posición **GND** (tierra) es la de referencia, la señal de entrada queda desconectada (no se cortocircuita) y se conecta la entrada del osciloscopio a 0 V.

El atenuador determina la magnitud de la señal presente a la entrada del amplificador. Debe presentar una relación constante a todas las frecuencias, es decir, debe ser un atenuador compensado.

La atenuación máxima suele ser del orden de 500:1, en una secuencia 1-2-5-10. Con esta secuencia, los cambios de sensibilidad correspondientes (expresados en dB) son prácticamente iguales. El cambio de un valor a otro de atenuación, se efectúa mediante los conmutadores **V/DIV** ubicados en el panel frontal; junto con este control se dispone también de un ajuste fino de ganancia **GAIN VERNIER**, que permite tener una atenuación intermedia con ajuste continuo entre los pasos calibrados.

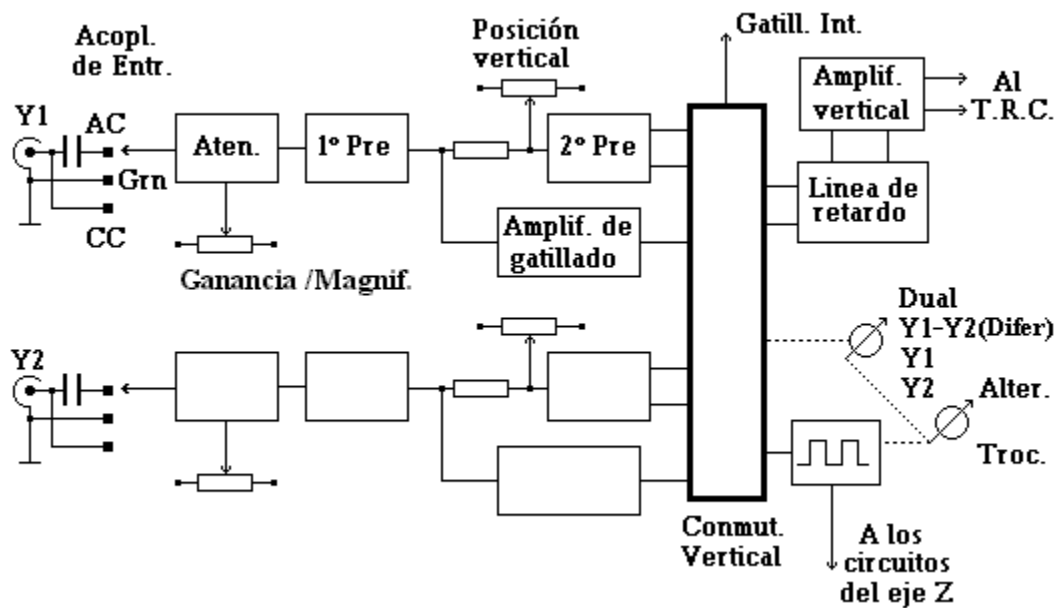


Fig. 6-11 Esquema en bloques de los canales verticales de un osciloscopio de doble trazo.

A continuación del atenuador se sitúa un preamplificador (el control de ganancia se efectúa sobre esta etapa). En esta parte del circuito y luego del control de ganancia se superpone a la señal que se maneja una tensión continua ajustable por medio de un control al efecto ubicado en el panel frontal, que determina la posición del trazo sobre la grátícula.

Un conmutador permite que ambos canales usen el amplificador final de deflexión vertical, que es único. La conmutación puede hacerse de forma alternativa presentando un canal en cada barrido (modo **ALTERNADO**), o bien trazando sucesivamente un fragmento de cada canal a lo largo de un único barrido (modo **MUESTEADO** o **TROCEADO**). En este ultimo caso, debe suprimirse el haz al pasar de un canal al otro, y lógicamente puede darse el caso de que se pierda un transitorio rápido en un canal mientras se esta pasando al otro, por eso conviene usar el modo alternado para tiempos de barrido cortos, y el troceado para tiempos de barrido altos.

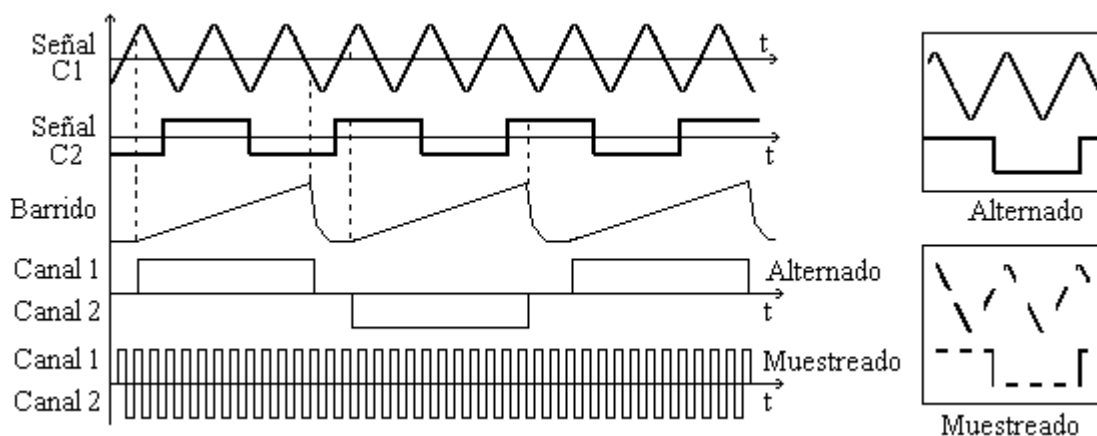


Fig. 6-12 Modos dual alternado y dual muestreado

La mayoría de los osciloscopios efectúan este cambio en forma automática pasando de uno a otro modo al variar la llave selectora de velocidad de barrido; no obstante en aquellos en que es posible seleccionar el modo en forma manual, puede llegar a verse el efecto que el mismo produce en la imagen.

Cuando los osciloscopios disponen de dos canales, suele haber varias opciones en la elección de las señales presentadas en la pantalla. Por ejemplo; puede ser que se permita la visualización de: Canal 1 (Y_1), Canal 2 (Y_2), Canales Y_1 e Y_2 (Alt/Troceado), o la suma o diferencia $Y_1 + Y_2$, e $Y_1 - Y_2$.

Entrada de señal en modo diferencial.

En la opción $Y_1 - Y_2$, en el amplificador del eje Y , que es diferencial, se toma Y_1 como entrada positiva e Y_2 como negativa. Esto permite realizar medidas diferenciales, si se igualan las características de los canales antes de la medida, lo cual puede ser de utilidad si se desea analizar una señal flotante presente en una parte determinada de un circuito. (Como se puede ver en el ejemplo de la siguiente figura, el empleo de la entrada normal puede producir un cortocircuito a través de la conexión de tierra en el circuito bajo pruebas. Esto no ocurre si se emplea el modo diferencial.)

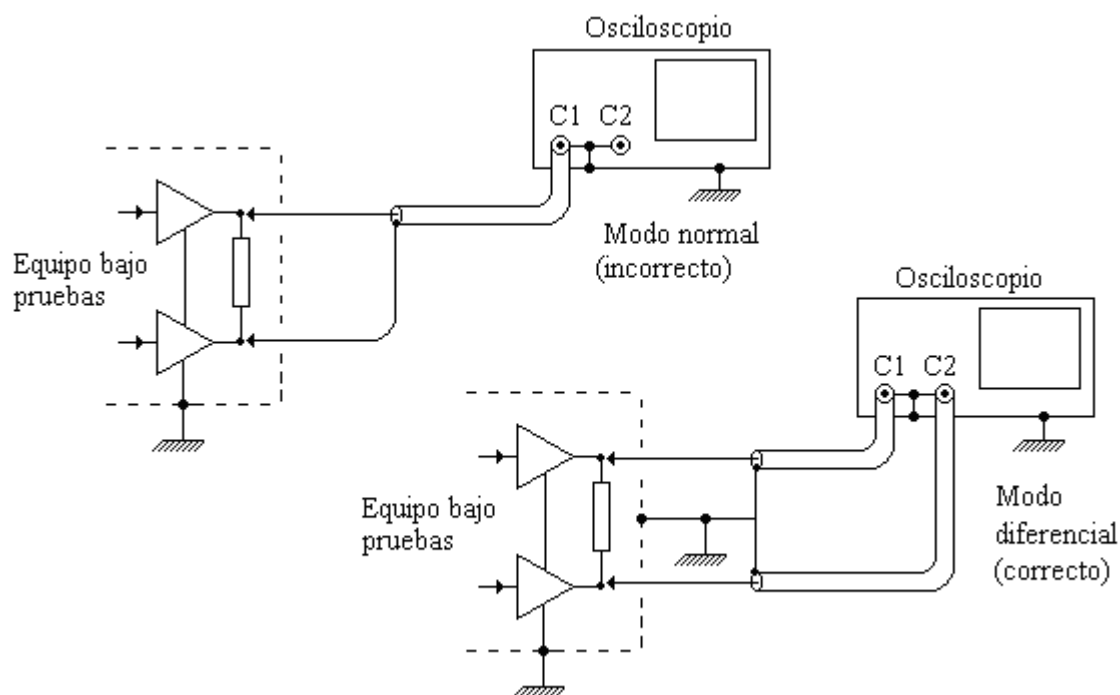


Figura 6- 13 Empleo de un osciloscopio de dos canales en modo diferencial.

Por último, a la entrada del amplificador de deflexión vertical, se dispone de una línea de retardo, que puede ser un tramo de coaxil arrollado o un circuito impreso especial: la línea de retardo tiene como función demorar la llegada de la señal a visualizar a las placas de deflexión vertical, con el fin de compensar el retardo que se produce en los circuitos de deflexión horizontal desde la generación de la señal de disparo hasta que comienza efectivamente el barrido. Se puede observar así la parte inicial del flanco de subida de la señal que dispara al osciloscopio.

Sondas de entrada para osciloscopios

La impedancia de entrada del atenuador compensado en el canal vertical de un osciloscopio típico, es generalmente de $1\text{M}\Omega$ en paralelo con una capacidad que oscila entre 10 a 50 pF. Por lo tanto la impedancia varía con respecto a la frecuencia. Es por eso que en la mayoría de las mediciones a efectuar, y para facilitar la conexión del osciloscopio al circuito donde se desea efectuar la medición, se debe recurrir al uso de una sonda externa.

Lamentablemente no hay una sonda universal, sino que deben elegirse de acuerdo al tipo de medición a efectuar. Sin embargo las mas difundidas dentro del tipo de las sondas pasivas siguen mas o menos la misma configuración que se muestra en el dibujo de la Figura 6-14.

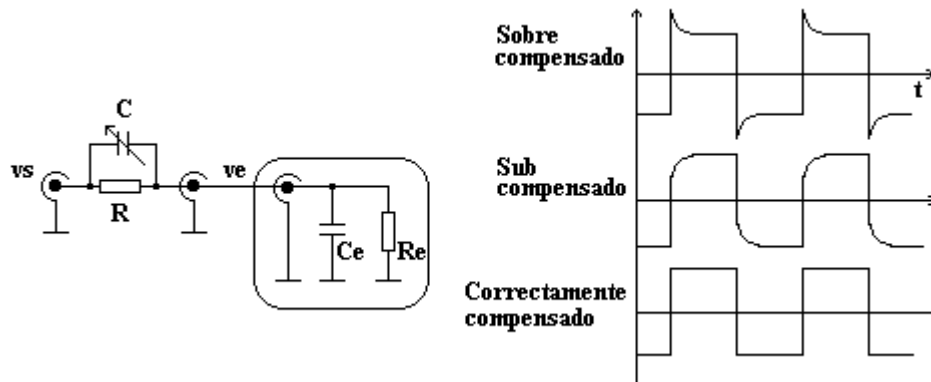


Fig. 6-14 Sonda pasiva con atenuador y oscilogramas de compensación

La tensión de entrada al canal vertical del osciloscopio que suministra una sonda como la de la figura anterior es:

$$V_e = V_s \frac{Z_e}{Z + Z_e} = V_s \frac{R_e}{\frac{1 + j\omega \cdot R_e \cdot C_e}{1 + j\omega \cdot R \cdot C} \cdot R + R_e}$$

Si se cumple que $R_e C_e = RC$, entonces,

$$V_e = V_s \cdot \frac{R_e}{R + R_e}$$

Con independencia de la frecuencia. Como C_e varía de un osciloscopio a otro, e incluso de un canal a otro en el mismo osciloscopio, se hace C ajustable. Para el ajuste se emplea la señal de calibración o ajuste de sonda del propio osciloscopio, que es una onda cuadrada de 1 KHz. De esta forma se compensa también la capacidad del cable coaxial.

En la Figura 6-14 se observan los oscilogramas que se obtienen con una punta sobrecompensada (es decir con exceso de ganancia en las altas frecuencias), o bien con una punta subcompensada (con pérdida de ganancia en altas frecuencias). La obtención de una forma de onda cuadrada, indica una punta adecuadamente compensada.

Las sondas divisoras de tensión como la que se ha descrito, proporcionan una mayor resistencia de entrada y una menor capacidad a masa, claro que a costa de una atenuación adicional de la señal, o sea una pérdida de sensibilidad.

OSCILOSCOPIOS ESPECIALES

El título que precede a esta parte del presente texto, quizás no sea del todo adecuado, dado que en la actualidad, a algunos de los tipos de osciloscopios que se estudiarán, (por ejemplo los osciloscopios digitales), ya no les cabe el rotulo de “especiales”. Esto es así debido en parte al gran salto que se ha dado en los últimos años en lo que respecta a la difusión de los mismos (la que se ha visto ayudada por la continua disminución de los costos). El título se mantiene por una razón didáctica, es decir para hacer una diferencia entre los instrumentos analógicos de usos generales y el resto de los osciloscopios.

Osciloscopios con doble base de tiempo

Algunos osciloscopios incorporan en su canal horizontal una segunda base de tiempos, con lo cual el instrumento pasa a tener “doble base de tiempos”. Aunque no hay una norma al respecto, comúnmente se las suele denominar como “Base de tiempos A” (a la base de tiempos principal) y “Base de tiempos B” (a la segunda base de tiempos), pudiendo el osciloscopio trabajar con cualquiera de las dos indistintamente o con la combinación de ambas. Al combinar ambas bases de tiempo, es posible analizar por tramos o secciones una forma de onda representada en forma cómoda debido a la gran estabilidad de imagen que se consigue.

En su forma mas sencilla, el esquema en bloques del sistema de deflexión horizontal de un osciloscopio de este tipo es el que se representa en el siguiente dibujo.

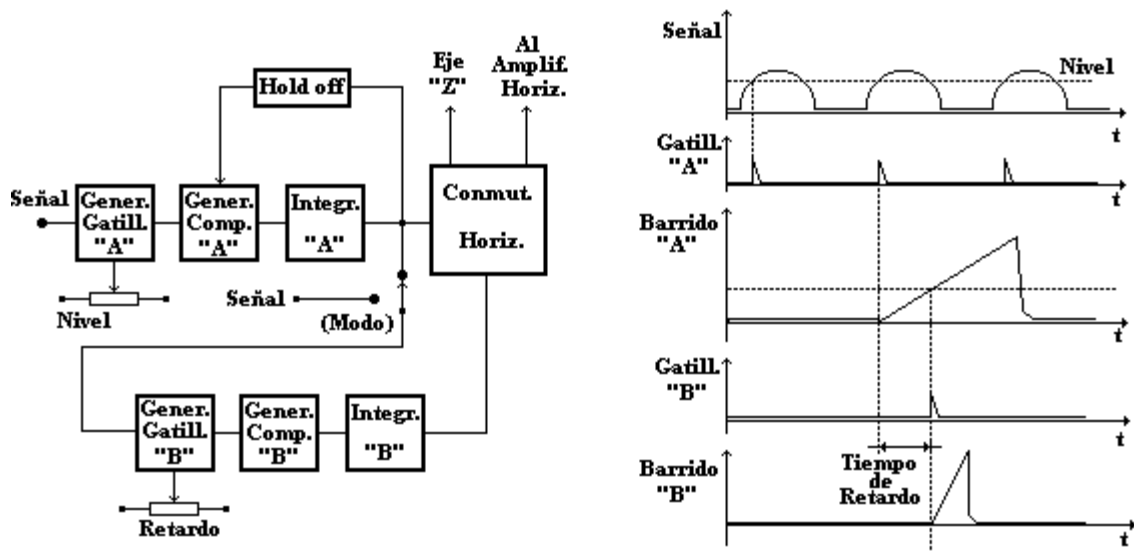


Fig. 6-15 Canal horizontal de un osciloscopio con doble base de tiempos.

Cuando el instrumento se dispone para trabajar en el modo doble base de tiempos la base de tiempos "B" se dispara mediante un circuito que toma como nivel de disparo el que se obtiene de la comparación del diente de sierra de la base "A" con una tensión ajustable mediante un potenciómetro accesible desde el panel del instrumento. Generalmente este control posee un dial o vernier calibrado, por ejemplo, en cien pasos que indica el retardo del disparo de la base de tiempos "B" en fracciones del tiempo total de barrido de "A". La

duración del diente de sierra de "B" siempre será, como regla general, menor que el tiempo de barrido de "A" (aunque generalmente esto no es automático y el operador debe tener muy en cuenta este detalle).

El diente de sierra de "B" puede usarse para producir dos efectos. En el primero de ellos, puede intensificarse el trazo de la imagen producida por el barrido "A" a partir del inicio y durante el tiempo que dura el barrido "B". La otra opción es usar como barrido principal para el osciloscopio directamente el diente de sierra del generador "B"; se consigue así un efecto análogo al que se obtendría en un osciloscopio con base de tiempos única al usar el magnificador horizontal, claro que sin los problemas de disminución del brillo y temblequeo (o Jitter) de la imagen que suelen producirse en este caso. Los siguientes dibujos, aclararán este aspecto.

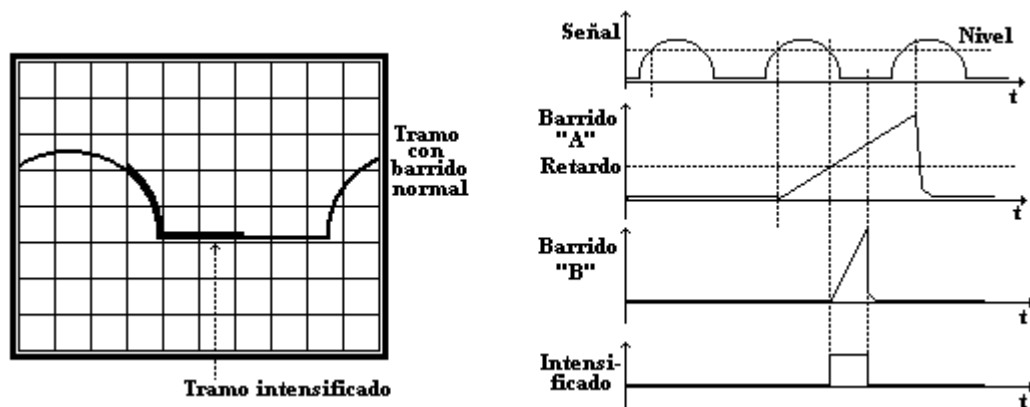


Fig. 6-16 a Barrido con base de tiempos "A" intensificada por "B".

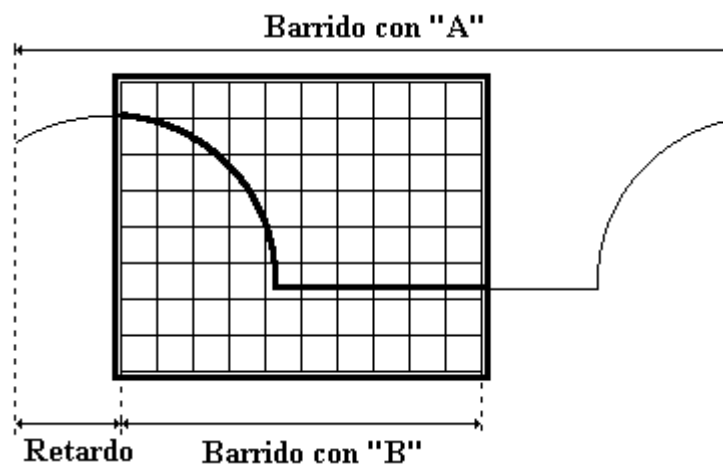


Fig. 6-16 b Barrido con base de tiempos "B" retardada por "A"

En realidad, las posibilidades que ofrece un instrumento de esta naturaleza para efectuar mediciones van mucho mas allá de la función básica descrita en el párrafo precedente. Por ejemplo; el instrumento puede utilizarse para la medición de intervalos de tiempo usando el dial o vernier calibrado. Como el mismo, divide con gran exactitud el tiempo total de

barrido de "A" se pueden determinar la distancias relativas entre dos puntos específicos de una forma de onda representada en la pantalla. Por otro lado es importante destacar que ya que la base de tiempos "B" se genera teniendo como referencia el diente de sierra de "A" se produce el disparo en forma muy controlada aunque la parte de la señal que se quiere analizar no tenga el nivel ni la pendiente apropiada.

Oscilloscopios Analógicos de muestreo

En los oscilloscopios analógicos preparados para el análisis de señales de frecuencias muy elevadas (desde unos 500 MHz hasta el orden de los varios GHz.) se requiere el uso de técnicas de muestreo, ya que el empleo de un T.R.C. como pantalla, presenta limitaciones para trabajar con velocidades de barrido elevadas debido a la natural reducción del brillo que se produce.

Los oscilloscopios de muestreo analógicos resultan el equivalente eléctrico del estroboscopio, que es un instrumento que permite la observación visual de dispositivos mecánicos que giran rápidamente, mediante la iluminación breve de posiciones repetidas ligeramente avanzadas entre si en sucesivas rotaciones (el lector seguramente habrá visto algo parecido en los sistemas que se emplean para balancear los neumáticos de automóviles).

En la figura 6-17 se representa el fundamento de la técnica. Supongamos que la señal a visualizar consiste en un tren de pulsos específicos periódicos. Se toma una muestra en el instante (**ta**) próxima al comienzo del pulso, la que se representa hasta el instante (**tb**) en que se toma la segunda muestra que dista de (**ta**) un tiempo levemente superior al periodo de la onda estudiada y así sucesivamente.

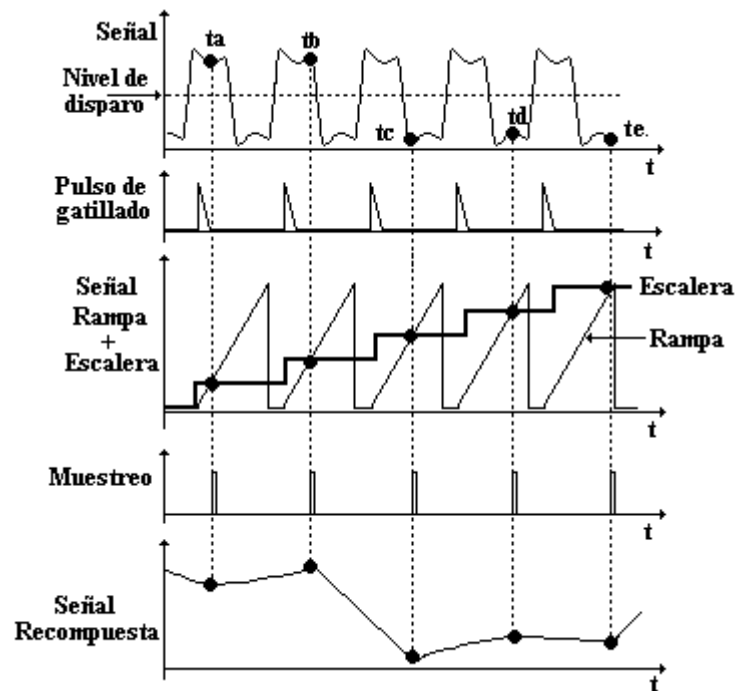


Fig. 6-17 Principio de funcionamiento de un osciloscopio de muestreo analógico

El proceso de muestreo de sucesivos valores de la señal representándolos individualmente, produce una réplica ensanchada de la forma de onda original. La manera en que se consiguen las señales para la toma de muestras está detallada en la parte inferior del dibujo anterior. Se genera una rampa rápida, sincronizando su iniciación con los pulsos de disparo (que pueden obtenerse de alguna fuente externa o de la misma señal de entrada vertical). También se genera una tensión en forma de escalera, cuya magnitud aumenta a razón de un paso al fin de cada rampa. Las muestras se toman cuando cada rampa creciente corta a la forma de onda en escalera. En estas condiciones, el intervalo entre dos tomas es ligeramente superior al periodo del tren original. La señal en escalera corresponde a la desviación sobre el eje horizontal, ya que su valor es proporcional al tiempo en que se produce la porción muestreada de la forma de onda. Si el incremento de tiempo de cada paso es lo suficientemente pequeño, la imagen parece continua (igual que sucede en el barrido troceado de los osciloscopios de doble trazo).

El campo de utilización de este tipo de instrumentos siempre ha sido el de las señales de radio frecuencias de microondas (por ejemplo; equipos de radar), por lo que habitualmente estos osciloscopios disponen de entradas preparadas para medir señales procedentes de fuentes de baja impedancia (ver el siguiente párrafo). En caso de ser necesario medir sobre fuentes de mayor impedancia se necesitan puntas de pruebas activas especiales que suelen incluir dentro de los accesorios del instrumento.

Entradas de baja impedancia (50Ω)

Los osciloscopios para altas frecuencias suelen incorporar, además de la entrada de alta impedancia ($1M\Omega$), una entrada de 50Ω , la cual está disponible normalmente en el mismo conector de entrada, pudiendo elegirse el valor de impedancia mediante un selector. La principal ventaja de la entrada de baja impedancia es que se reduce notablemente el efecto que produce la capacidad en paralelo con la entrada (típicamente entre 20pF y 30pF) en el ancho de banda del osciloscopio. (Para dar un ejemplo, si la capacidad de entrada es de 20pF , un cálculo simple da un valor de 800Ω para la impedancia que el mismo presenta a una frecuencia de 10MHz , lo cual es un valor muy bajo si se lo compara con $1M\Omega$, no así si el valor es 50Ω). En osciloscopios en los que la entrada de baja impedancia no esta disponible internamente, puede lograrse el mismo efecto colocando un resistor externo de 50Ω en paralelo con la entrada (el resistor debe ser adecuado para alta frecuencia). Lógicamente, la entrada de baja impedancia resulta apropiada para efectuar mediciones sobre circuitos o sistemas cuya impedancia es inherentemente baja.

Osciloscopios digitales.

Conceptualmente, desde el punto de vista de la función que cumple, un osciloscopio digital hace exactamente lo mismo que un osciloscopio analógico, es decir el análisis de señales en el dominio del tiempo. En parte por este motivo es que, inicialmente, los fabricantes trataron de mantener, en lo posible, la forma del panel y los controles de los osciloscopios digitales a la manera clásica de los instrumentos analógicos; posiblemente para tratar de vencer la natural resistencia del público usuario al cambio, de modo que el manejo y las aplicaciones de un osciloscopio digital fueran, en esencia, las mismas que las de un osciloscopio analógico.

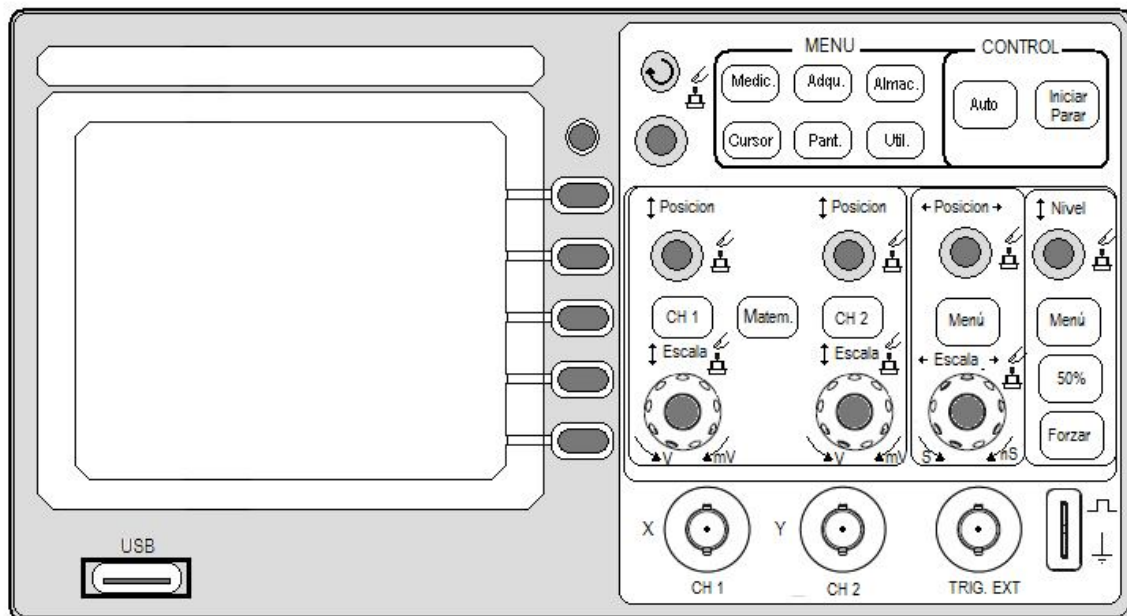


Fig. 6-18 Esquema del panel de controles de un osciloscopio digital típico.

Esta práctica se mantiene aunque, por la natural evolución de las cosas, en los osciloscopios digitales modernos hay una serie de funciones y modalidades que son exclusivas de los mismos y que no están disponibles en los osciloscopios analógicos. Esto se debe a que hay una diferencia fundamental, que se deriva del principio de funcionamiento de un osciloscopio digital, ya que la digitalización de una señal implica que la misma debe muestrearse cuantificarse y memorizarse; por ende un osciloscopio digital es inherentemente un osciloscopio de almacenamiento. Además una vez que se disponen de los datos digitales estos pueden almacenarse o transferirse a algún tipo de soporte externo (por ejemplo mediante una salida USB). También pueden manipularse, lo que da lugar a otras posibilidades; por ejemplo, muchos osciloscopios digitales modernos disponen de “módulos matemáticos” que permiten, mediante el empleo de un algoritmo de cálculo, pasar del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, con lo que el instrumento se convierte en un “Analizador de Fourier” (tema que será abordado en la Unidad 12). Este módulo matemático también agrega algunas posibilidades de cálculo extra que permiten determinar en forma automática valores de tensión, frecuencia y/o periodo de la señal visualizada, sin que intervenga la apreciación del operador, siendo muy

común que la información numérica correspondiente y otras de interés, se presente simultáneamente sobre la imagen de la señal estudiada convirtiendo así al osciloscopio en un verdadero instrumento de “medición” mas que de “análisis”. Estos datos se presentan mediante un menú que se suele desplegar sobre uno de los márgenes o al pie de la imagen y el control de las opciones disponibles se efectúa, por lo general, con un teclado ubicado al costado de la pantalla.

Una funcionalidad muy importante que poseen casi todos los osciloscopios digitales modernos es el “Autoset”, que ajusta automáticamente la base de tiempos y la sensibilidad vertical a valores óptimos, lo cual facilita bastante el empleo del instrumento.

En la figura 6-19 se muestra el diagrama en bloques de un osciloscopio digital típico.

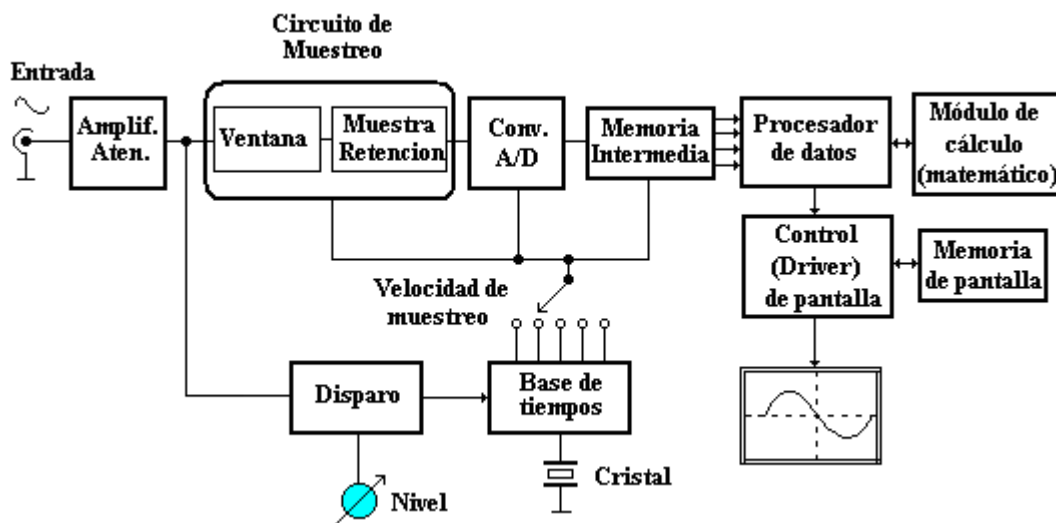


Fig. 6-19 Diagrama en bloques de Osciloscopio Digital

En el diagrama presentado pueden reconocerse las siguientes partes:

- Atenuador / Amplificador de entrada.
- Circuito de muestreo (Ventana – Muestra/Retención).
- Conversor Analógico Digital.
- Circuito de disparo y base de tiempos.
- Memoria intermedia.
- Procesador de datos (con módulo matemático).
- Control – driver – (con memoria de pantalla).

El amplificador / atenuador de entrada es similar en su concepción y funcionamiento a los circuitos utilizados en los osciloscopios analógicos convencionales, es decir que se trata de un amplificador lineal cuya impedancia de entrada es elevada, y un atenuador por pasos compensado en frecuencias.

En el circuito de muestreo, se realiza la toma de los datos correspondiente a puntos sucesivos de la señal de entrada durante una “Ventana” de tiempo de modo equivalente al barrido efectuado en un osciloscopio analógico.

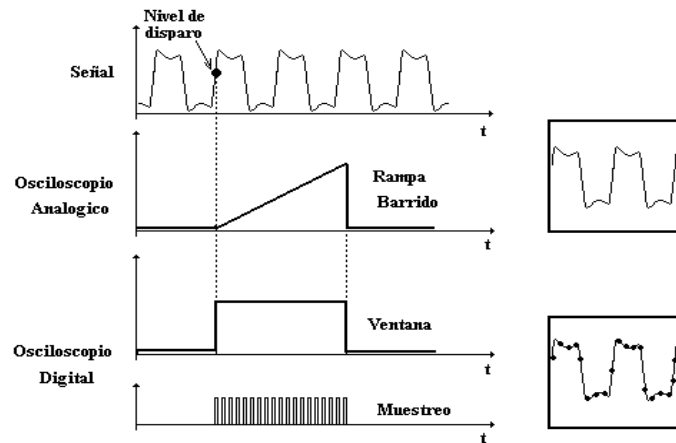


Fig. 6-20 Barrido – Ventana - Muestreo

El circuito de Muestra / Retención es necesario para que la señal esté en un nivel estable al realizar la conversión analógico / digital. La apertura y cierre del circuito que toma la muestra se efectúa antes del comienzo de la conversión. Al cierre de la toma de muestra le sigue el periodo de retención que dura como mínimo el tiempo de conversión, luego del cual sigue un nuevo ciclo de muestra / retención - conversión. El valor de la muestra se retiene en algún tipo de circuito de almacenamiento, por Ej. en un condensador seguido de un amplificador de alta impedancia.

El convertor A/D cuantifica el nivel almacenado en el circuito de retención y lo transforma en un dato numérico. Su funcionamiento es una de las claves de un instrumento de este tipo, pues la respuesta en frecuencia y la resolución del mismo están ligadas directamente con el tiempo de conversión y la cantidad de bits del convertor. En instrumentos de bajo ancho de banda o en aquellos que usan una técnica denominada muestreo secuencial (que se estudiara un poco mas adelante) se usan convertidores de aproximaciones sucesivas; en cambio en los instrumentos de mayor ancho de banda se usan convertidores tipo flash. En ambos casos son habituales resoluciones de ocho (8) bits como mínimo.

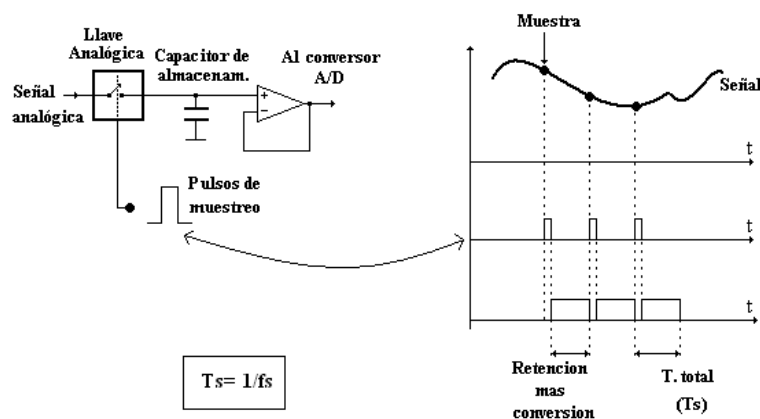


Fig. 6-21 Muestreo de una señal analógica.

Los datos almacenados en la memoria digital intermedia, son tomados desde el procesador de datos que los manipula convenientemente a fin de reconstruir la señal en el dispositivo

de visualización (TRC o pantalla de estado sólido). El procesamiento incluye varias funciones, por ejemplo, en los osciloscopios digitales se debe, en determinadas circunstancias, interpolar entre los datos correspondientes a muestras sucesivas a fin de generar los puntos necesarios para que la imagen presentada en la pantalla sea continua. Otras funciones, que dependen del tipo de instrumento, y que se verán mas adelante, permiten obtener presentaciones de promedio o con detección de pico. Finalmente hay un control de la pantalla que, en el caso de osciloscopios con sistema de persistencia, incluye una memoria de pantalla (que debe diferenciarse de la memoria digital intermedia asociada al conversor A/D).

Velocidad de muestreo.

Si se pretende reconstruir fielmente una señal analógica continua en el tiempo, a partir de la captura de muestras, la toma de las mismas se debe efectuar con una separación mínima (T_s) entre si, es decir a una determinada velocidad. De acuerdo con el teorema del muestreo esta frecuencia (f_s) debe ser al menos igual al doble de la frecuencia de la señal analógica que se quiere muestrear ($f_{\text{señal}}$).

$$f_s = 2 \cdot f_{\text{señal}} \quad ; \quad f_s = 1/T_s$$

La frecuencia mínima de muestreo requerida se conoce como *frecuencia de Nyquist* (Asimismo es común referirse al *teorema del muestreo* como “*teorema de Nyquist*”)

Desde luego, estas expresiones, constituyen un limite teórico. Por esta razón, para obtener una representación fiel de la señal y para reducir los efectos de la aparición de frecuencias “Alias”, es preferible no trabajar cerca de este limite; por eso en la mayoría de los osciloscopios digitales modernos se busca tomar mas muestras de las necesarias, siendo habituales valores entre cinco y diez veces por encima de la frecuencia de Nyquist.

Frecuencias Alias (Aliasing)

Si la velocidad de muestreo empleada en un osciloscopio digital es insuficiente, pueden aparecer erróneamente componentes de frecuencia mas bajas que la de la señal analógica que se pretende analizar. Estas componentes falsas se denominan “Alias”.

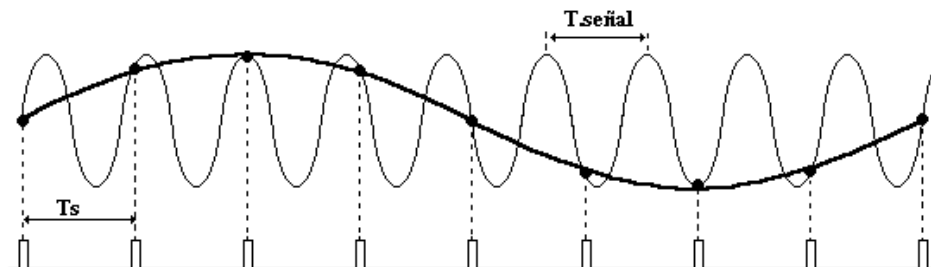


Figura 6-22 Un muestreo a menor velocidad que la requerida produce “Alias”.

Puede ocurrir en determinadas circunstancias, que se obtenga la visualización de una señal de frecuencia mas baja que en realidad no existe. Por ejemplo, en la figura precedente, un múltiplo exacto del periodo de muestreo ($8 \cdot T_s$) coincide con un múltiplo del periodo de la señal analógica ($9 \cdot T_{\text{señal}}$), por ende en lugar de la señal verdadera (trazo fino) que no se puede reconstruir a partir de las muestras capturadas, estaría apareciendo una señal falsa (trazo grueso). Para resolver este problema, muchos osciloscopios digitales incluyen un sistema de filtros para limitar el ancho de banda del instrumento, y es importante que el operador de un osciloscopio digital tenga en cuenta este dato a fin de evitar posibles errores en el análisis y/o medición de determinadas señales.

Especificaciones de velocidad de muestreo.

Para quien se encuentra por primera vez frente a las especificaciones de velocidad de muestreo y ancho de banda en un osciloscopio digital es natural que aparezcan dudas o confusiones. Por ej. Si el ancho de banda de un osciloscopio digital es 100 MHz ¿Significa esto que la frecuencia de muestreo debe ser también 100 MHz, o que las dos cosas son lo mismo.?. En realidad, como se lo ha explicado previamente, la frecuencia de muestreo debería ser mayor que la frecuencia más alta que puede analizarse con el instrumento (en términos prácticos, su ancho de banda). Sin embargo puede ocurrir que sea bastante menor (esto tiene que ver con el tipo de técnica de muestreo empleada; lo cual se explicará en el siguiente punto). Por otro lado la velocidad de muestreo es una medida de cual es la **resolución en el tiempo** de un instrumento ya que, si se dejan de lado los puntos generados por interpolación, define la separación en el sentido horizontal entre dos muestras consecutivas en la imagen obtenida en la pantalla de un osciloscopio digital.

Es por esto que para ayudar a evitar confusiones, y por un acuerdo entre los distintos fabricantes, se ha convenido que el “*ancho de banda*” de los osciloscopios digitales se especifique de la manera tradicional (es decir en **MHz** o en **GHz**.); en tanto que, en lugar de la frecuencia de muestreo, se indica la “*velocidad de muestreo*” que se especifica en cantidad de muestras por segundo, es decir *Mega Muestras por segundo* o *Giga muestras por segundo* (se emplean las siglas en inglés **Msa/sec** - **Gsa/sec**).

Tipos de muestreo.

El tipo de muestreo mas natural, que se conoce como “**muestreo en tiempo real**”, consiste en capturar las muestra a una frecuencia que como mínimo es el doble de la frecuencia de la señal analógica que se analiza, tomando las muestras una a continuación de la otra, dejando un espacio de tiempo entre muestra y muestra que se emplea para efectuar la conversión A/D. Este es el tipo de muestreo que se emplea en osciloscopios digitales con ancho de banda relativamente reducido, o en instrumentos de mayor ancho de banda pero más sofisticados. Esto es así porque si el ancho de banda es elevado, el muestreo en tiempo real impone serios requerimientos al diseño de los circuitos de conversión A/D. Para dar un ejemplo, si se quiere obtener un ancho de banda equivalente al de un osciloscopio analógico de 100 MHz, es necesario tomar, al menos, muestras cada 5ns, y este sería el tiempo máximo disponible para efectuar la conversión, la cual solo es posible si se utiliza un tipo especial de conversor A/D.

Un recurso que se puede emplear para reducir las exigencias de tiempo de conversión, consiste en el uso de muestreo repetitivo. Una variante de esta técnica que se conoce como “**muestreo repetitivo secuencial**” consiste en efectuar varios barridos sucesivos disparados en el mismo instante pero tomando las muestras con un ligero desplazamiento en cada pasada, tal como se muestra en la figura 6-23. De este modo, la frecuencia de muestreo puede llegar a ser sensiblemente menor que el ancho de banda del osciloscopio. De todos modos el factor limitante para este caso sigue siendo el tiempo de conversión del convertidor A/D, pues de ningún modo podrán digitalizarse señales cuyo periodo sea menor que el periodo de muestreo.

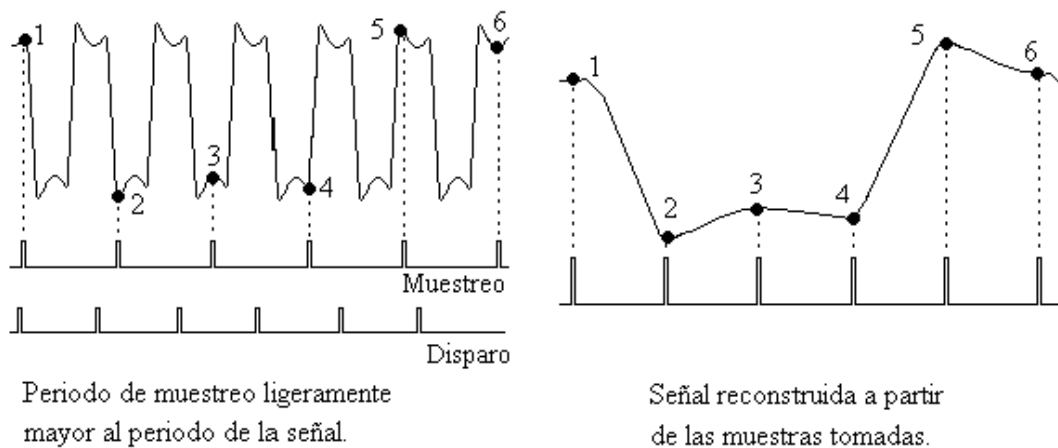


Fig. 6-23 Muestreo repetitivo secuencial.

El muestreo repetitivo secuencial, necesita un circuito de disparo muy estable que requiere un diseño cuidadoso y desde luego el método solo puede emplearse si la señal a estudiar, es periódica. Por ende puede dar lugar a la pérdida de información en el caso de la presencia de transitorios rápidos. Además siempre esta presente la posibilidad de aparición de las frecuencias “Alias”. Otra variante del muestreo repetitivo que permite salvar, dentro de ciertos límites, el problema de la pérdida de transitorios rápidos, se denomina “**muestreo repetitivo aleatorio**”. En esta técnica las muestras se toman en forma azarosa dentro del periodo de captura, y si el número de muestras es suficiente se reduce notablemente la probabilidad de pérdida de los transitorios rápidos, y de aparición de frecuencias “Alias”.

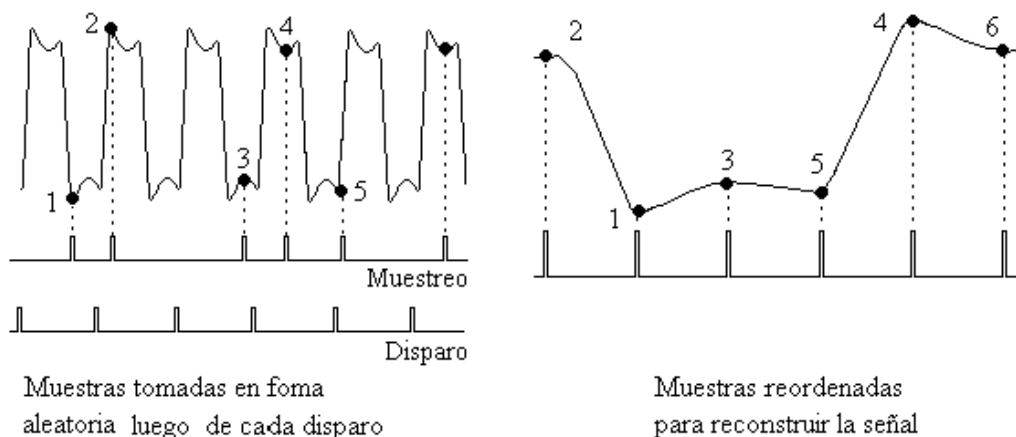


Fig. 6-24 Muestreo repetitivo aleatorio.

Muchos osciloscopios digitales combinan ambas técnicas, y emplean el muestreo en tiempo real cuando se está trabajando con señales de frecuencias bajas, y muestreo repetitivo, para frecuencias altas.

Frecuencia de muestreo efectiva.

Es evidente que la técnica de muestreo repetitivo viola, en cierto sentido, el teorema del muestreo. Sin embargo es una práctica que se encuentra bastante extendida ya que permite emplear conversores A/D relativamente lentos para digitalizar señales de frecuencia elevada obteniéndose, bajo ciertas condiciones, las mismas prestaciones que si se empleara muestreo en tiempo real. Por esto en los osciloscopios digitales que emplean esta técnica, se ha hecho necesario establecer cual es el valor de frecuencia de muestreo efectiva o equivalente, la cual viene dada por la siguiente expresión:

$$f.s.ef = 1/T.s.ef$$

donde:

$f.s.ef$ = Frecuencia de muestreo efectiva

$T.s.ef$ = Periodo de muestreo efectivo.

El periodo de muestra efectiva es igual al tiempo entre dos puntos consecutivos correspondientes en la forma de onda de la señal reconstruida a partir de las muestras.

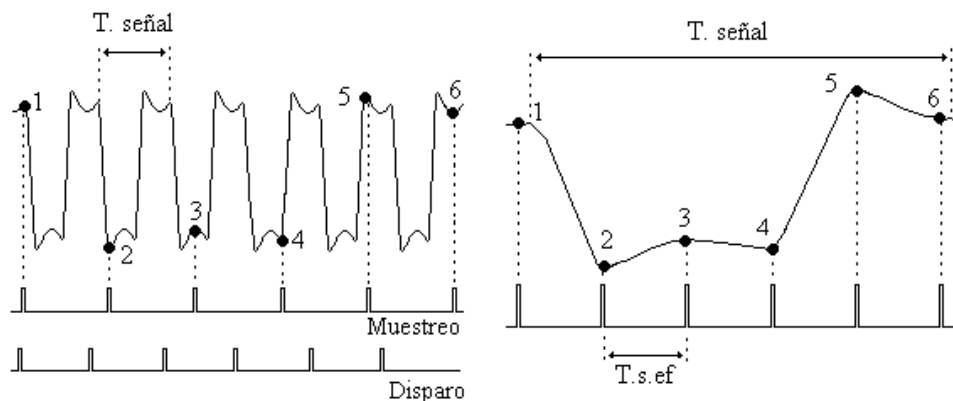


Fig. 6-25 Periodo de muestreo efectivo en osciloscopios de muestreo repetitivo.

El periodo de muestra efectiva no depende de la velocidad del conversor AD sino que está ligado a la precisión con la cual la muestra obtenida se ubica en relación con cada disparo, y en realidad define de manera más clara cual es la verdadera *resolución de tiempo* del instrumento. En un osciloscopio que emplea la técnica de muestreo repetitivo (secuencial o aleatorio) la velocidad efectiva de muestreo puede llegar a ser mucho más elevada que la velocidad real de muestreo; por ejemplo, si la velocidad de muestreo real es 20 Msa/sec, pero el $T.s.ef$ es 100 ps, la velocidad de muestreo efectiva es en realidad 10 Gsa/sec, con lo cual el ancho de banda del instrumento podría llegar alrededor de 1GHz.

Capacidad de memoria.

Una de las especificaciones más importantes de un osciloscopio digital, es la capacidad o tamaño de la memoria intermedia disponible, ya que la misma define cual es la longitud total de tiempo de la señal de entrada que el instrumento puede capturar. Lógicamente, la longitud total de tiempo de captura ($T_{\text{tot.cap}}$), puede aumentarse dentro de ciertos márgenes, disminuyendo la velocidad de muestreo, pero esto trae como consecuencia una disminución de la resolución en el eje de tiempo, con lo cual puede perderse información importante sobre transitorios rápidos presentes en la señal que se desea analizar.

La longitud del tiempo de captura es particularmente importante cuando deben analizarse señales no repetitivas (transitorios o eventos únicos), especialmente si el evento es de larga duración.

El valor de la longitud total de tiempo de captura viene dado por:

$$T_{\text{tot.cap.}} = N_s \cdot T_s = N_s / f_s$$

Donde:

N_s = Número de muestras almacenadas en la memoria (capacidad de la memoria).

T_s = Intervalo entre las muestras.

f_s = Frecuencia de muestreo.

Un ejemplo numérico ayudará a comprender la relación que existe entre la capacidad de la memoria y la velocidad de muestreo. Supóngase que la velocidad máxima de muestreo de un osciloscopio digital de 40MHz es 200 Msa/sec; que la capacidad de memoria es de 2000 puntos de muestra; y que la base de tiempos puede ser ajustada entre 5seg./div y 2ns/div. El máximo valor de tiempo de señal que se puede capturar si la frecuencia de muestreo es la máxima especificada es:

$$T_{\text{tot.cap.}} = 2000 / 200 \text{ (Msa/sec)} = 10 \mu\text{s}$$

Si la pantalla tiene 10 divisiones sobre el eje X, significa que un tiempo total de $10\mu\text{s}$ correspondería a $1\mu\text{s/div}$. lo cual indica que para valores de la base de tiempos que estén por encima de $1\mu\text{s/div}$ (es decir para base de tiempos mas lentas) la velocidad máxima de muestreo no puede mantenerse. En el caso de que la base de tiempos se disponga en $10\mu\text{s/div}$, la velocidad de muestreo debería ser:

$$f_s = N_s / T_{\text{tot.cap.}} = 2000 / 100 \mu\text{s} = 20 \text{ (Msa/sec)}.$$

Por ende, en este caso, la cantidad de muestras por segundo a tomar debe disminuirse notablemente. Esto puede lograrse de dos maneras, una es reducir la frecuencia de muestreo, la otra es mantener la frecuencia de muestreo, pero enviar a la memoria solo una de cada diez muestras tomadas, descartando el resto.

La velocidad de muestreo puede llegar a ser aun mas baja todavía. Por ejemplo, en el caso extremo de que la base de tiempos se disponga en 5 seg/div, la cantidad de muestras por segundo debería ser:

$$f_s = N_s / T_{\text{tot.cap.}} = 2000 / 50 \text{ s} = 40 \text{ muestras/seg.}$$

Si por el contrario, la base de tiempos se dispone en valores menores a $1\mu\text{s/div}$, la cantidad de muestras tomadas no alcanzaran para completar la totalidad de los puntos que se

requiere para mantener la resolución del eje X. En este caso, el procesador de datos tendrá que generar los puntos intermedios faltantes mediante interpolación, y en este sentido hay varios técnicos y/o algoritmos que pueden emplearse para tal fin.

Sea cual fuera la técnica que se utilice, es evidente que la capacidad de la memoria tiene un efecto importante sobre la velocidad de muestreo que, en definitiva, se termina utilizando.

Base de tiempos y circuito de disparo.

Como se ha explicado en párrafos anteriores, el instante en que se comienzan a tomar las muestras y la secuencia que se sigue deben estar perfectamente definidos y ser repetibles a fin de obtener un muestreo adecuado de la señal de entrada. El funcionamiento del circuito de disparo (o trigger) está ligado con el reloj (clock) que sincroniza la base de tiempos, el cual además también se usa para habilitar los circuitos de memoria en el instante correcto y transfiriendo luego los datos al resto del circuito.

La base de tiempos estable se equipara con la señal de diente de sierra utilizada en los osciloscopios convencionales para hacer corresponder el desplazamiento en el eje horizontal con el tiempo. Sin embargo a diferencia de los instrumentos analógicos en los cuales se deben producir un barrido a continuación de otro para que se mantenga una imagen persistente, en un osciloscopio digital el funcionamiento resulta similar al trabajo en el modo barrido único, pues una vez producida la condición de inicio se efectúa la toma de datos y su almacenamiento en la memoria; si la señal que se analiza es periódica, no se necesita que el ciclo se repita para que la misma sea cómodamente observada. Esto pone en evidencia una desventaja de los osciloscopios digitales mas primitivos o menos sofisticados si se los compara con un osciloscopio analógico de tiempo real, ya que si la señal esta compuesta de una parte periódica y otra que no lo es (por ejemplo una señal compuesta de video), si el disparo se hace sobre la parte periódica de la señal, puede quedar la impresión de que toda la señal capturada es periódica. Para resolver este problema, los osciloscopios digitales modernos suelen incluir el funcionamiento en modo de *persistencia digital* (tema que será examinado mas adelante).

Para el operador de un osciloscopio (ya sea analógico o digital), una de las partes que mas dificultades presenta, para su uso correcto, es el disparo de la base de tiempos: Esto se debe a que muchos instrumentos permiten una gran variedad de maneras de ajustar el disparo para poder afrontar un problema particular de medición o análisis de una determinada señal; por ende es muy importante conocer claramente los distintos modos y maneras de manejo y empleo del disparo.

Al igual que en los osciloscopios analógicos, en todos los osciloscopios digitales se usa el disparo por pendiente, en sus variantes de pendiente positiva (+ slope) y negativa (- slope). La mayoría dispone también de Hold off variable y asimismo se puede seleccionar la fuente de disparo entre los modos Externo – Interno – Línea. Sin embargo hay una serie de variantes relacionadas con el disparo de la base de tiempos que raramente se encuentran en osciloscopios analógicos, aunque son muy comunes en instrumentos digitales. Por poner un ejemplo, en algunos osciloscopios digitales es frecuente que se disponga de la posibilidad de visualización de la forma de onda de disparo externo a fin de facilitar el ajuste del sistema. Suelen haber, además, otras posibilidades que se discuten a continuación.

Disparo por doble pendiente.

El modo de *disparo por doble pendiente* permite que el barrido del osciloscopio se dispare de la misma manera a partir de un nivel determinado, tanto en flancos ascendentes (pendiente +) como descendentes (pendiente -). Esto significa que cualquier pendiente de la señal que se emplea como fuente de disparo (interna o externa), actuará como suceso de disparo e iniciará un nuevo barrido o captura.

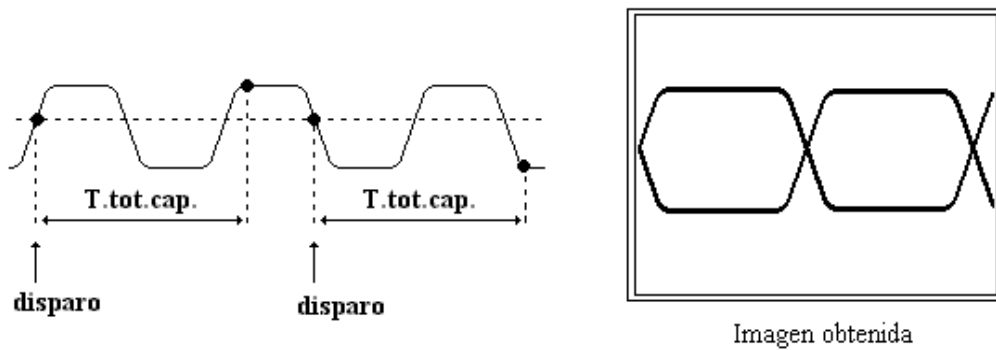


Fig. 6-26 Disparo por doble pendiente - Presentación obtenida.

Este modo de disparo facilita la obtención de un tipo de presentación que se denomina "Diagrama de ojo", la cual se suele emplear para evaluar la calidad de señales digitales, (algo que se estudiará un poco mas adelante).

Disparo por ancho de pulso.

El disparo por ancho de pulso se suele emplear cuando el osciloscopio se utiliza para visualizar formas de onda del tipo trenes de pulsos o que estén relacionadas con trenes de pulsos. En este modo (que se conoce como *glitch trigger*), se monitorea la duración de los pulso que componen la señal presente a la entrada de uno de los canales Y, o la que se emplea como fuente externa y el disparo se produce cuando se cumple una condición determinada de ancho. Por ejemplo, en la figura siguiente se muestra una señal formada por pulsos con distinto ancho. En este caso es posible ajustar la condición de disparo de manera que se ignoren los pulsos cuyo ancho sea mayor a 100ns.

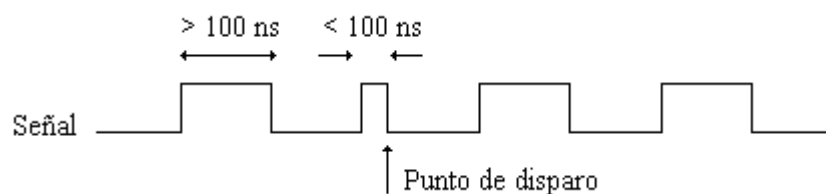


Fig. 6-27 Disparo por ancho de pulso.

Desde luego se podría disponer que el disparo se ejecute para una duración menor que un determinado valor. Este modo puede resultar útil, por ejemplo, cuando se necesitan detectar fallas por defectos en la temporización de circuitos digitales.

Disparo por patrón de estados lógicos.

El disparo de la base de tiempos a partir de una única referencia es suficiente en muchas aplicaciones, pero cuando se desea analizar un conjunto completo de señales simultáneas, en osciloscopios que poseen varios canales de entrada, puede ser necesario emplear un tipo de modo de disparo mas sofisticado. En el modo de disparo por patrón de estados lógicos se considera, a cada una de las señales presentes en los canales de entrada “Y” del osciloscopio, como si fuera un nivel lógico (0 o 1) a partir de un cierto nivel de decisión, que puede ser ajustado desde el panel del instrumento, y el disparo se produce cuando los niveles lógicos coinciden con un *patrón de disparo*. El número de bits del patrón puede ser elegido por el operador, es decir que las señales presentes en cada canal pueden ser consideradas o ignoradas para un propósito determinado. Este modo de disparo puede ser empleado, por ejemplo, para sincronizar el barrido con una determinada condición de un bus de datos.

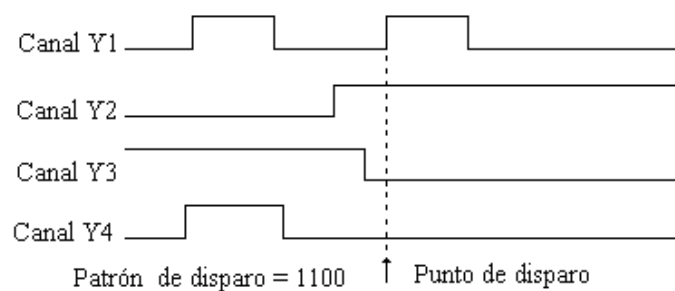


Fig. 6-28 Disparo por patrón de estados lógicos.

Una versión mejorada del disparo por patrón de estados lógicos, que suele estar disponible en algunos instrumentos, agrega la condición de duración en el tiempo de patrón. En este caso, el operador puede especificar un valor de tiempo mínimo de duración del patrón para que ocurra un disparo válido.

Disparo por cambio de estado.

Un modo de disparo muy parecido al que se describe en el punto anterior, es el *disparo por cambio de estado*. Cuando se emplea este modo, uno de los canales Y, o la entrada de disparo externo, se configura como un suerte de “clock” del sistema de disparo de la base de tiempos, pudiendo optarse por el flanco positivo o negativo. El disparo ocurre cuando se da simultáneamente la condición de un patrón de estados determinado más la aparición de un flanco (subida o bajada) en el canal que se emplea como clock.

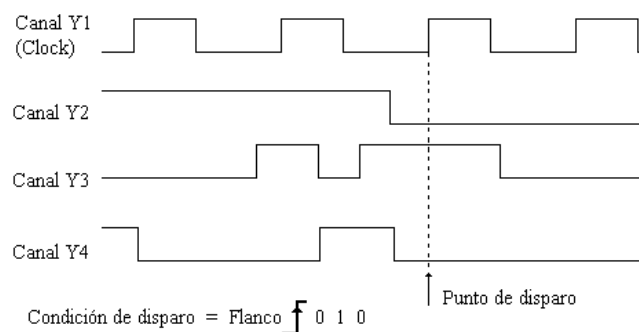


Fig. 6-29 Disparo por cambio de estado.

La diferencia entre el modo de disparo por cambio de estado y el disparo por patrón de estados lógicos es muy sutil, pero real. Obsérvese que en el modo de disparo por patrón, el mismo puede coincidir con un flanco, pero este puede darse en cualquiera de los canales, en tanto que el disparo por cambio de estado, solo se produce si el flanco ocurre en la señal que se toma como clock. En este sentido, el modo de disparo por cambio de estado, es muy útil cuando se desea analizar señales en condiciones en que estas se encuentran validadas por un clock.

Disparo por tiempo de transición.

En un osciloscopio convencional, el disparo por pendiente se produce cuando la señal alcanza un nivel de tensión determinado. En los instrumentos que poseen el modo de *disparo por tiempo de transición* se toma en cuenta el tiempo transcurrido entre dos puntos determinados de la pendiente de la señal de entrada (que puede ser la de subida o la de bajada), para lo cual se requieren de dos controles de ajuste de nivel mas un sistema de medición del tiempo transcurrido. Generalmente es posible ajustar el disparo de manera que este se ejecute si el tiempo de transición es mayor o menor que un determinado valor.

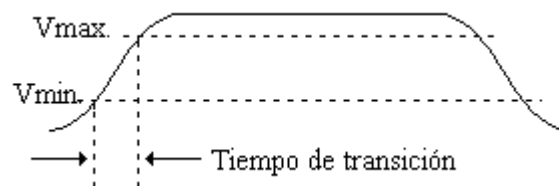


Fig. 6-30 El tiempo de transición entre dos niveles se emplea para validar el disparo.

Este modo puede emplearse para observar un evento que ocurre en una señal ante la presencia de un tiempo de transición determinado, por ejemplo, para el análisis fallas causadas por valores excesivos del tiempo de duración de pendientes en un sistema digital.

Disparo por tiempo de preparación o tiempo de retención

Los circuitos digitales secuenciales, (p. Ej. flip-flops, registros, y contadores) se caracterizan por que emplean el flanco de una señal de reloj (clock) para sincronizar la transferencia de las señales lógicas de un dispositivo a otro. Para que este tipo de circuitos opere adecuadamente, los niveles de las señales lógicas deben permanecer en un estado determinado (alto o bajo) por un tiempo especificado, que se conoce como "*tiempo de preparación*" (setup time) antes de que ocurra el flanco del clock. De igual manera debe

suceder lo mismo después que ha pasado el flanco del clock, lo que se conoce como “*tiempo de retención*” (Hold time).

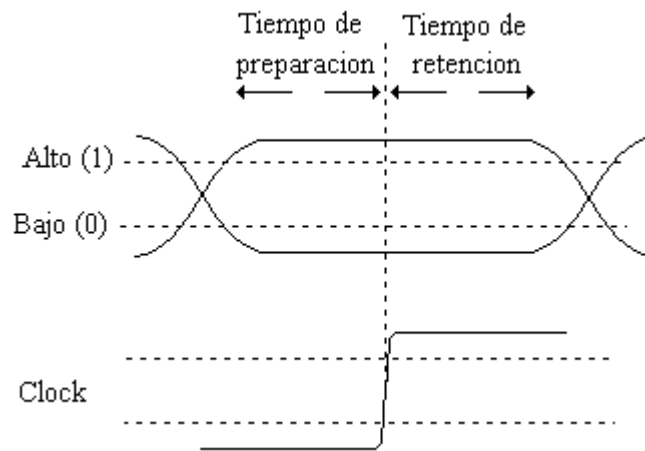


Fig. 6-30 El tiempo de preparación o el tiempo de retención se pueden emplear para validar el disparo de la base de tiempos.

En el modo de *disparo por tiempo de preparación*, el disparo se ejecuta si no se verifica un determinado valor especificado de tiempo de preparación, es decir si la señal no presenta un estado estable (alto o bajo) durante el tiempo que precede al flanco de clock. El modo de disparo por tiempo de preparación se suele emplear en osciloscopios de dos canales, en los cuales uno de ellos se conecta a la señal de datos y el otro canal, o en su defecto la entrada de disparo externo, a la señal de clock. El modo de *disparo por tiempo de retención* trabaja de manera similar, es decir que el disparo se produce si la señal de datos no es estable por un determinado tiempo después de ocurrido el flanco del clock.

Resolución vertical en los osciloscopios digitales.

La resolución del eje vertical (eje Y) de un osciloscopio digital esta directamente ligada con la resolución del conversor A/D empleado por el circuito de muestreo del instrumento. Como ya se ha estudiado previamente, la resolución de un conversor A/D viene dada por la cantidad de bits (N) empleada por el mismo. Si la tensión de entrada varia entre cero y un valor máximo V_{max} . se tiene:

$$V_{res} = V_{max} / 2^N$$

Como el valor máximo de la tensión de entrada puede variar dependiendo del ajuste del atenuador del canal Y del osciloscopio, resulta mas conveniente expresar la resolución como un porcentaje del valor de plena escala que se puede visualizar en la pantalla del instrumento.

$$\text{Resolución (\%)} = 100 / 2^N$$

La tabla siguiente muestra los valores de resolución porcentual que se obtiene en función de la cantidad de bits del conversor A/D.

Número de bits (N)	Resolución vertical
6	1,56%
7	0,78%
8	0,39%
9	0,20%
10	0,098%
11	0,049%
12	0,024%

A modo de ejemplo, en un osciloscopio analógico típico, el eje vertical de la pantalla suele tener alrededor de 8 cm y el grosor del trazo puede ser entre 0,3mm y 0,4 mm. Con estos valores, la resolución vertical es, en el peor de los casos, del 0,5 %. Esto significa que para que un osciloscopio digital iguale la resolución de un instrumento analógico, debería utilizar por lo menos un conversor A/D de 8 bits.

Distintas técnicas o modalidades de presentación en pantalla.

Como se ha explicado inicialmente, la principal característica de los osciloscopios digitales es que la señal de entrada se captura y se transforma en datos digitales. Estos datos pueden ser procesados de distinta manera para lograr presentaciones con determinadas características en la pantalla del instrumento. Algunas de estas posibilidades se analizan a continuación.

Modo de persistencia digital.

A fin de lograr una presentación en pantalla similar a la que se obtiene en los osciloscopios analógicos de tiempo real, la mayoría de los osciloscopios digitales modernos emplean un algoritmo de persistencia, el cual, en líneas generales, trabaja de la siguiente manera. Supóngase que el sistema de muestreo captura una determinada señal, la imagen presentada en la pantalla está compuesta por una serie de puntos (píxeles) con una intensidad correspondiente. La memoria de pantalla guarda estos datos, y en las siguientes capturas si la forma de onda de la señal no coincide con la inicial, se va disminuyendo gradualmente la intensidad de los píxeles hasta que desaparecen. Este tipo de presentación puede ser útil, por ejemplo, para que el operador aprecie en la imagen obtenida, si la forma de onda corresponde a una señal periódica, o distinguir entre las partes de la forma de onda que son periódicas y las que no lo son.

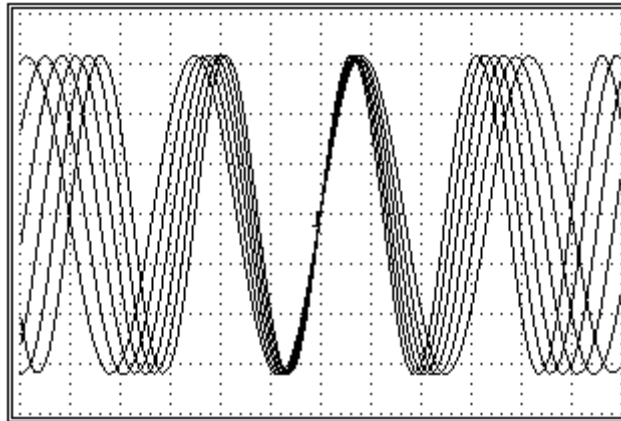


Fig. 6-31 Una señal de frecuencia variable presentada en modo de persistencia digital.

En algunos osciloscopios digitales, la tasa de disminución de intensidad entre sucesivas capturas puede regularse mediante un control al efecto que se encuentra disponible en el panel. Este tipo de instrumentos se conocen como “*de persistencia variable*”. En algunos casos, se puede emplear un modo denominado “*persistencia infinita*”. El funcionamiento en modo persistencia infinita es equivalente al modo “memoria” de los antiguos osciloscopios analógicos de almacenamiento (en los cuales esta característica se lograba merced a un tipo especial de TRC). El modo persistencia infinita permite, por ejemplo, analizar fenómenos transitorios o eventos únicos, o bien medir el Jitter (temblequeo) presente en señales digitales.

Función captura de “Promedio”.

En algunos osciloscopios digitales, (particularmente en aquellos que tienen módulos matemáticos, y una capacidad de memoria de pantalla suficiente) se pueden encontrar disponibles la función de captura con *promedio*. Esta función permite analizar o efectuar mediciones sobre señales que presentan ruido superpuesto ya que se puede obtener una presentación mas estable.

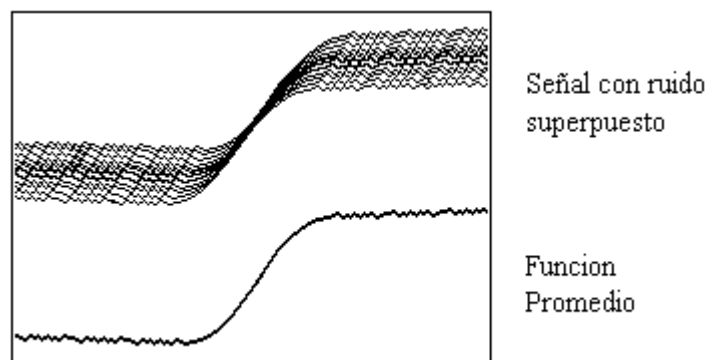


Fig. 6-32 Señal con ruido eliminado con las función Promedio.

Para la obtención de la presentación del promedio el modulo matemático calcula el valor medio de varias muestras asociadas con el mismo punto de la forma de onda. Para ello es necesario efectuar varias capturas sucesivas y por lo general, suele ser posible fijar el numero de muestras que se promediarán. Como se puede ver en la figura, se consigue una presentación “limpia” del efecto del ruido similar a la que se obtendría si se pasara la señal por un filtro, pero sin el efecto de limitación del ancho de banda que el mismo produciría.

Función captura con “Detección de pico”.

Como se ha explicado previamente, muchas veces cuando la base de tiempos de un osciloscopio digital se ajusta para valores elevados de tiempo por división, es imposible acumular todos los datos en la memoria si se pretende mantener la frecuencia de muestreo en su máximo valor; esto es debido a la limitación impuesta por la capacidad de la memoria digital intermedia. En algunos osciloscopios, este problema se resuelve empleando el recurso de descarte decimal; por ejemplo, se almacenan en la memoria solo una muestra de cada tantas otras capturadas (10,100, etc.). Obviamente, esto puede ocasionar la pérdida de información de transitorios rápidos.

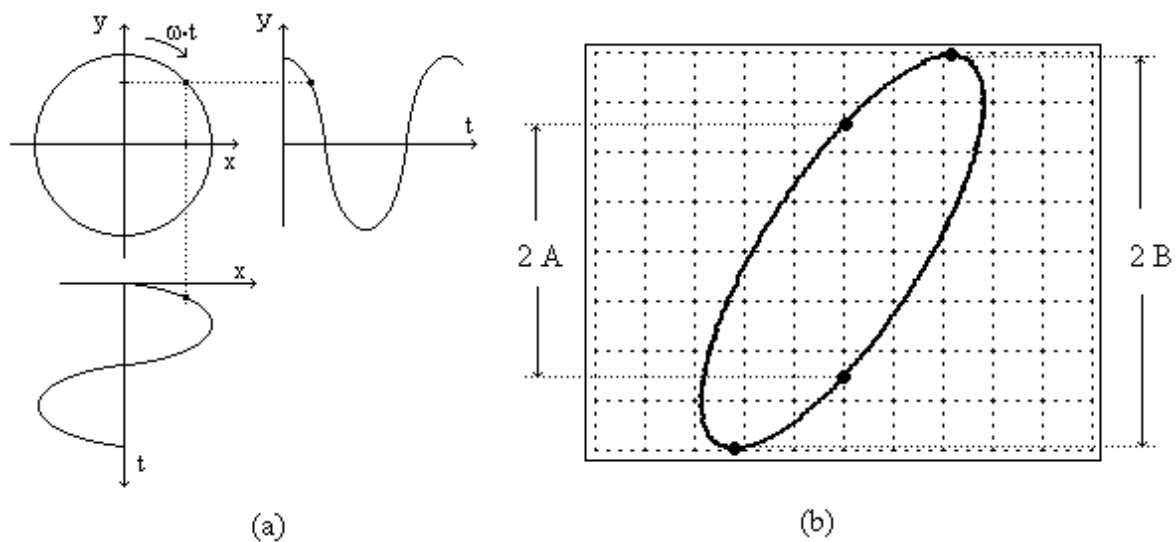
Para resolver este problema, muchos osciloscopios digitales emplean la técnica de captura con *detección de pico*. En este caso, mediante el empleo de un algoritmo que va comparando las sucesivas muestras, se van calculando y acumulando en la memoria los datos correspondientes a los valores pico máximo y pico mínimo de la señal durante el periodo de muestreo. De esta forma se pueden capturar los transitorios a una velocidad equivalente a la máxima posible sin sobrepasar la capacidad de la memoria. La principal desventaja de esta función es que puede llegar a exagerar el efecto del ruido superpuesto.

Apéndice: Mediciones con osciloscopios.

Mediciones de fase mediante la figura de Lissajous.

El modo X-Y de un osciloscopio puede emplearse, entre otras cosas, para obtener cierto tipo de imágenes denominadas "figuras de Lissajous", que pueden servir para determinar la diferencia de fase entre dos señales de la misma frecuencia.

Por ejemplo: Si dos señales de la misma amplitud A , y frecuencia ω , entre las cuales existe una diferencia de fase igual a $\pi/2$, se aplican a los ejes X e Y de un osciloscopio, (cuya pantalla pasa así, a representar un sistema de coordenadas cartesianas), se obtiene, como se puede ver en la figura siguiente, una imagen en forma de círculo de radio A . Dicho círculo se origina en la rotación del punto luminoso con una velocidad angular ωt .



Para valores de fase relativa distinta de $\pi/2$, y distintas amplitudes, se obtienen en general figuras elípticas, como se observa en la figura (b). La diferencia de fase puede determinarse a partir del oscilograma mediante mediciones sencillas. En efecto, si se considera que:

$$x = X \sin \omega t \quad ; \quad y = B \sin (\omega t + \phi)$$

De la figura (b) se deduce que cuando

$$x = 0 \quad ; \text{ entonces } \quad y = A$$

Lo cual se repetirá para

$$\omega t = 0, 2\pi, \dots, n\pi$$

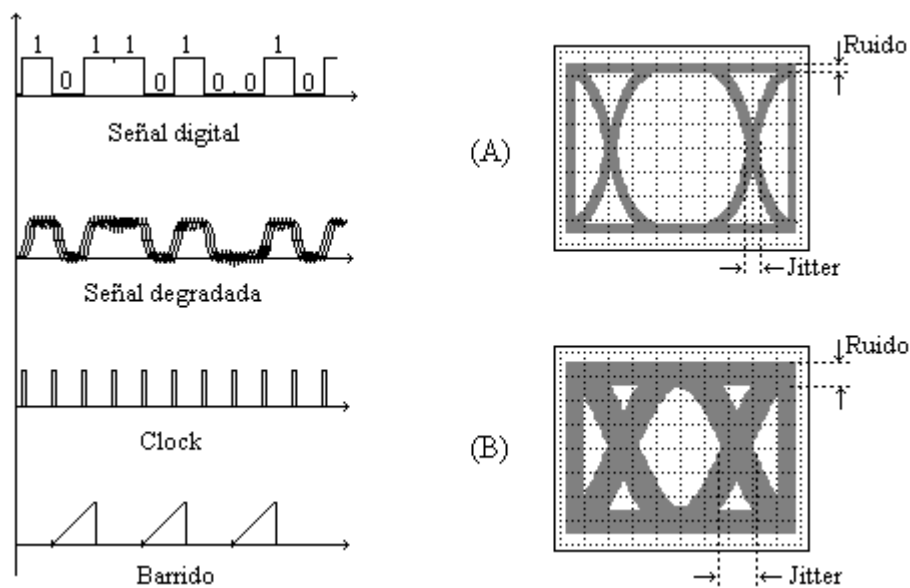
Entonces, para $\omega t = 0$, se tiene:

$$y = B \cdot \sin \phi = A \quad \therefore \quad \frac{A}{B} = \sin \phi$$

Diagramas de ojo

Se denomina “diagrama de ojo”, a un tipo de figura que puede obtenerse mediante el uso de un osciloscopio, y que se emplea para evaluar la calidad de una señal digital determinada. Los principales factores que afectan a la calidad de las señales digitales son el ruido, y las variaciones instantáneas de fase de la señal respecto de la referencia usada, (es decir el clock). En un sistema de comunicaciones digital, estos defectos pueden conducir a la producción de errores en el proceso de decodificación y el diagrama de ojo suele servir para efectuar una comprobación rápida de las condiciones en que opera dicho sistema.

El método permite efectuar una evaluación cualitativa de la "perfección" de una señal digital. Para ello, la misma debe aplicarse a la entrada "Y" del osciloscopio, mientras que se dispara el barrido con una referencia fija de manera tal que se obtenga un tipo de figura como la que se observa en el dibujo siguiente.



El primer gráfico muestra una señal digital compuesta por una secuencia de ceros y unos. Debajo de la misma se representa la misma señal que ha sufrido una degradación, la cual se origina por lo general, en el agregado de ruido (que afecta a la amplitud) mas un aumento de los tiempos de crecimiento amen de ligeras diferencias de tiempo entre el pulso de clock y los flancos de la señal digital (Temblequeo o Jitter).

Si el osciloscopio se dispara externamente con el Clock del sistema, y se elige el tiempo de barrido adecuadamente, puede obtenerse un oscilograma como el que se muestra en (A), y que tiene la forma de un "ojo", el cual se cierra o se abre en función de la mayor o menor degradación de la señal estudiada.

Por ejemplo; el ancho del trazo que bordea al "ojo" permite obtener información a cerca de la magnitud del ruido superpuesto a la señal, la cual queda reflejada por el grosor del trazo en sentido vertical; y del "jitter" o temblequeo, que produce lo propio pero en sentido horizontal; (esto se puede ver en el dibujo B). Por otro lado, el incremento del tiempo de crecimiento, que se origina en la reducción del ancho de banda de los circuitos usados, produce un efecto de cierre del "ojo".

En resumen: Un diagrama que muestra un "ojo" bien definido y "abierto" representa una señal digital de calidad. Por el contrario cuando el ojo se cierra significa que se está en presencia de una señal con cierto grado de degradación.

Medición de formas de ondas no senoidales

Los instrumentos tales como Voltímetros, y Amperímetros para CA están preparados, por lo general, para medir señales con forma de onda sinusoidal e indicar su valor eficaz, aunque internamente suelen utilizar un detector de respuesta al valor medio (salvo en el caso de los voltímetros True RMS que ya se han estudiado).

Sin embargo, existen numerosas situaciones prácticas donde es necesario medir señales que no son senoidales, y en esos casos se puede recurrir al uso de un osciloscopio que permita, además de averiguar cual es la forma de onda, determinar, al menos aproximadamente y entre otras cosas, el valor eficaz de las mismas.

Una lista de las diferentes formas de onda mas comunes que pueden encontrarse es:

- Ondas Triangulares.
- Ondas Cuadradas.
- Ondas casi senoidales.
- Trenes de pulsos.

En algunos casos puede determinarse cierta cota de corrección, que permita, una vez determinada el tipo de señal en juego, medir el valor eficaz mediante un voltímetro, y otras veces el mismo se puede obtener directamente por calculo a partir de los valores obtenidos del oscilograma.

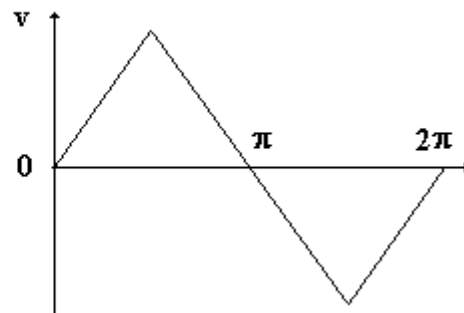
Ondas Triangulares. Valor medio de módulo y Valor eficaz.

El valor medio de modulo de una onda triangular se calcula como sigue:

$$V_{med} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} V_p \frac{2t}{\pi} dt = \frac{1}{2} V_p$$

Y su valor eficaz es:

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} V_p^2 \frac{4 \cdot t^2}{\pi^2} dt} = \frac{V_p}{\sqrt{3}}$$



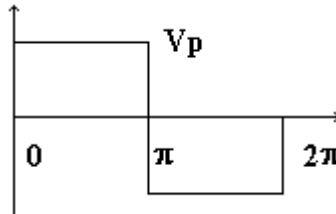
Multipliando el valor medio de la onda triangular por el factor de forma y determinando el error entre el valor indicado y el valor eficaz verdadero, obtenemos el error que se presenta al medir esta forma de onda con un voltímetro de respuesta al valor medio:

$$\text{error}\% = \frac{(1,11/2) - (1/\sqrt{3})}{1/\sqrt{3}} \cdot 100$$

$$\text{error}\% = -3,81\%$$

Ondas Cuadradas.

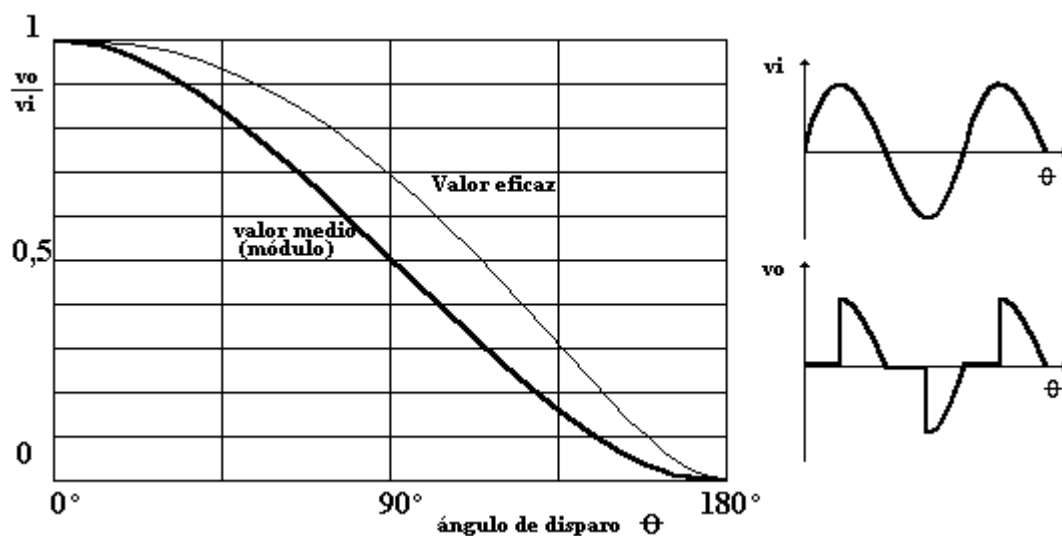
En una onda cuadrada, el valor medio es igual al valor pico y al valor eficaz, de manera que la determinación de su valor eficaz mediante un osciloscopio es muy fácil. Si se usa un voltímetro con detector de valor medio, se cometerá un error en la indicación, del 11 % en exceso.



(En los ejemplos anteriores, cuando se hace mención del valor medio del módulo, se refiere al valor medio calculado entre 0 y π).

Medición de la tensión entregada por circuitos con R.C.S de onda completa

Algunas de las formas de onda mas comunes de encontrar en Electrónica industrial, son las que están presentes en circuitos que utilizan Triacs o rectificadores controlados de silicio (R.C.S.). En estos casos, y para un dado valor pico, los valores eficaz y medio de modulo, son función del ángulo de conducción, el cual puede determinarse mediante un osciloscopio. Si la carga es resistiva pura (no reactiva), pueden calcularse fácilmente mediante integración la cantidad de valores suficientes para trazar una curva que muestre como varían los mismos en función del ángulo. Dichas curvas se muestran en la figura siguiente. Para que esta gráfica sea útil en cualquier caso, se ha normalizado el eje vertical usando la relación v_o/v_i . Las curvas permiten realizar el calculo del error, y la correspondiente cota de corrección que debe aplicarse si se miden estas formas de onda con instrumentos de respuesta al valor medio.



Curva de comparación entre el valor eficaz verdadero y el valor medio (del módulo) de un circuito con control de ángulo de disparo de onda completa.

Como puede verse en la curva que se muestra, el error máximo se produce para un ángulo de conducción de 90 °. en este caso el valor indicado es menor que el valor verdadero. El error va disminuyendo a medida que el ángulo de conducción va discrepando hacia arriba o hacia abajo de los 90 °.

Mediciones de formas de ondas especiales, (trenes de pulsos)

Hay algunas formas de ondas en las cuales la determinación de los parámetros que las definen es prácticamente imposible a partir del uso exclusivamente de instrumentos tales como los voltímetros. Los trenes de pulsos son una de estas formas de ondas; en señales de este tipo, puede ser útil conocer:

- Su período y su frecuencia.
- Su valor pico y su valor medio (o componente de CC)
- Su valor eficaz
- Su factor de cresta y su ciclo de trabajo

La mayoría de estos datos pueden ser obtenidos a partir del análisis de la señal por medio de un osciloscopio.

Significado del factor de cresta y del ciclo de trabajo

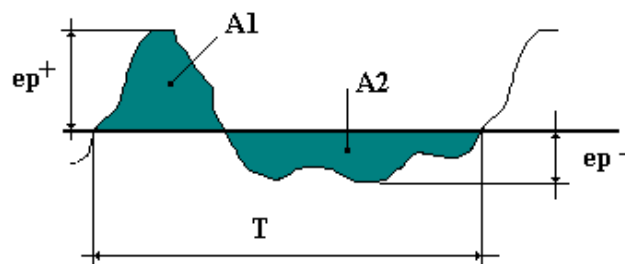
Cuando se está en presencia de formas de ondas no senoidales, (particularmente trenes de pulsos) cobran especial importancia los términos "Ciclo de trabajo" y "factor de cresta". Las definiciones y expresiones que se dan a continuación corresponden a aproximaciones que se efectúan en la suposición de que las señales que se miden pueden asemejarse a una forma de onda rectangular (lo que en la práctica se acerca bastante a la realidad).

El "factor de cresta" (FC) se define como la relación entre el voltaje pico y el valor eficaz de la forma de onda considerada (sin tomar en cuenta la componente de continua de dicha onda). Para cualquier forma de onda (como la de la figura siguiente) que no tiene componente de CC, el factor de cresta vale:

$$FC = \frac{ep^+}{e(e_f)} \quad \text{ó bien} \quad \frac{ep^-}{e(e_f)}$$

El que sea mayor.

A1 es igual a A2 (por definición).



El valor eficaz es:

$$e(\text{ef}) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T e^2 \cdot dt}$$

Debido a que un tren de pulsos representa un caso extremo de una forma de onda no sinusoidal periódica, y en algunos casos es una aproximación razonable a un impulso de ruido, se trata a continuación esta forma de onda. Para una forma de onda pulsante como la de la figura que sigue, se tiene:

$$e(a) + e(b) = e(\text{pp}) \quad ; \quad e(a) \cdot t_o = e(b) \cdot (T - t_o)$$

Si el ciclo de trabajo (D) se define como:

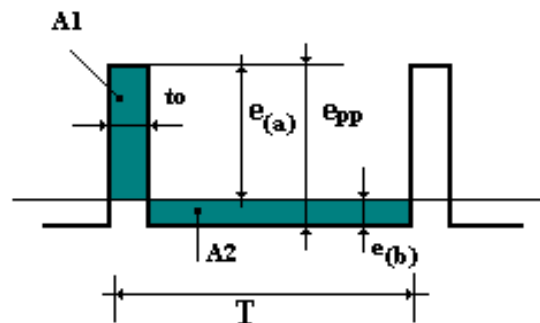
$$D = t_o / T$$

Entonces,

$$e(b) = e(\text{pp}) \cdot D$$

y,

$$e(a) = e(\text{pp}) \cdot (1 - D)$$



El valor eficaz de la suma de $e(a)$ mas $e(b)$ (en relación con el valor de $e(\text{pp})$) será, luego de efectuar la integral:

$$e(\text{ef}) = \sqrt{\frac{e(\text{pp})^2 \cdot (1 - D)^2 \cdot t_o + e(\text{pp})^2 \cdot D^2 \cdot (T - t_o)}{T}}$$

Operando y simplificando, se tiene

$$e(\text{ef}) = e(\text{pp}) \sqrt{D - D^2} \quad ; \quad e(\text{ef}) = e(\text{pp}) \sqrt{D(1 - D)}$$

Ya que por definición el factor de cresta (FC) es:

$$FC = e(a) / e(\text{ef})$$

Y considerando que el valor del ciclo de trabajo (**D**) esta comprendido entre 0 y 1/2, se tendrá:

$$FC = \frac{e(pp) \cdot (1-D)}{e(pp) \cdot \sqrt{D \cdot (1-D)}} = \sqrt{\frac{1}{D} - 1}$$

Se puede concluir que el factor de cresta y el ciclo de trabajo guardan cierta relación entre si. En efecto, para valores bajos de "**D**", el factor de cresta es aproximadamente igual a la raíz cuadrada de la inversa del ciclo de trabajo, por ejemplo:

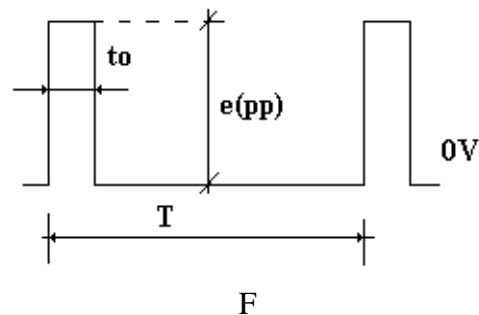
$$\text{Si } D = \frac{1}{100} \quad ; \quad FC = \sqrt{\frac{1}{1/100} - 1} = \sqrt{100 - 1} \approx 10$$

El valor eficaz de una forma de onda de pulsos cuya línea de base coincide con cero (es decir que tiene componente de CC) como la que se muestra en la figura siguiente es:

$$e(ef) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{t_o} e(pp) \cdot dt}$$

$$e(ef) = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot e(pp) \cdot t_o}$$

$$e(ef) = e(pp) \sqrt{t_o / T} = e(pp) \sqrt{D}$$

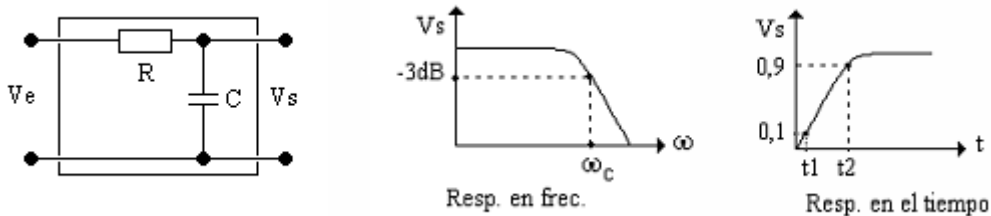


Este valor puede obtenerse también por medición del valor de CC (usando un voltímetro de CC) y del valor eficaz de la componente alterna (usando un voltímetro de valor eficaz verdadero con bloqueo de CC) y relacionando ambos valores de la siguiente forma:

$$e(ef) = \sqrt{(e_{CA})^2 + (e_{CC})^2}$$

Relación entre el tiempo de crecimiento y el ancho de banda

El tiempo de crecimiento de una red de dos puertos que tiene asociada una constante de tiempo RC, (es decir un sistema de segundo orden,) guarda una relación directa con el ancho de banda de sistema. En efecto, considerese una simple red de dos puertos (entrada u salida) que tiene asociada una constante de tiempo RC:



Se sabe que una red de este tipo puede ser analizada desde el punto de vista de la respuesta en el tiempo, o de la respuesta en frecuencia. En el primer caso se analiza que pasa a la salida de la red cuando a la entrada se aplica una excitación de tipo escalón. En el segundo caso el análisis se hace para una excitación de tipo sinusoidal cuya frecuencia se varía dentro de un amplio margen.

A partir del circuito equivalente precedente, y teniendo en cuenta la respuesta en el tiempo del mismo, puede deducirse que:

$$V_s = 1 - e^{-\frac{t}{R \cdot C}} \quad \therefore \quad 0,9 = 1 - e^{-\frac{t_2}{R \cdot C}} \quad ; \quad 0,1 = 1 - e^{-\frac{t_1}{R \cdot C}}$$

$$T_c = t_2 - t_1 \quad ; \quad T_c = (\ln 0,9 - \ln 0,1) \cdot R \cdot C$$

$$T_c = \ln \frac{0,9}{0,1} \cdot R \cdot C \quad ; \quad T_c = 2,19 \cdot R \cdot C$$

Donde:

T_c : tiempo de crecimiento del sistema

R : Resistencia

C : Capacidad

El ancho de banda del sistema puede determinarse teniendo en cuenta que:

$$\omega_c = \frac{1}{R \cdot C} \quad ; \quad f_c = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C}$$

Como la frecuencia de corte (f_c) es, en este caso, equivalente al ancho de banda (AB), se tiene entonces:

$$AB = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C} \quad \therefore \quad R \cdot C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot AB}$$

$$\text{Reemplazando : } T_{cd} = \frac{2,19}{2\pi \cdot AB} \quad ; \quad \text{o sea : } AB = \frac{0,35}{T_{cd}}$$

Cuestionario.

1. Por lo general todos los osciloscopios de doble trazo disponen, en el selector de “Modo Vertical”, de una posición denominada “ADD” (Suma). Este modo suele utilizarse juntamente con la opción “INV” (inversión) de uno de los canales Y. Cuando un osciloscopio se emplea de esta forma:

- (A) Es posible determinar la diferencia de fase entre dos señales de la misma frecuencia.
- (B) Funciona como un instrumento de canal único y entrada diferencial.
- (D) Permite visualizar una señal restando la componente de CC..
- (E) No es un modo que tenga utilidad. Debe ser evitado.

2. En el panel de controles de todo osciloscopio, suele haber una punto de prueba (TP) donde hay disponible una señal, generada internamente, de 1KHz, con forma de onda cuadrada que según lo indicado habitualmente en los manuales se emplea para “calibrar la punta de pruebas”. Dicho procedimiento se realiza:

- (A) Con la punta en posición X10 y es para calibrar la base de tiempos.
- (B) Con la punta en posición X10 y es para compensar la respuesta en frecuencia.
- (C) Con la punta en la posición X1 y es para compensar la respuesta en frecuencia.
- (D) Con la punta en la posición X1 y es para calibrar el nivel de disparo.

3. En el panel de controles de un osciloscopio típico, y dispuesto en la zona de controles de la base de tiempos, suele ubicarse el selector de “Fuente de disparo” cuya función es:

- (A) Permite seleccionar entre disparo: LF (low frec.) o HF (High frec.).
- (B) Permite seleccionar entre disparo: Automático – Normal – Único.
- (C) Permite seleccionar entre disparo: Interno – Externo – Línea.
- (D) Permite seleccionar entre disparo: CC – CA.
- (E) Permite seleccionar entre disparo: Pendiente positiva – Pendiente negativa.

4. En algunos osciloscopios de usos generales suele haber, cerca de la perilla de ajuste del nivel de disparo, un control denominado “Hold – Off”, cuya función es:

- (A) Modifica el tiempo de retención de la base de tiempos.
- (B) Modifica el tiempo de apagado del haz durante el retrazo.
- (C) Ajusta el tiempo de barrido.
- (D) Ajusta el valor máximo de la tensión del diente de sierra que produce el barrido.
- (E) En osciloscopios de dos canales, anula el barrido de uno de ellos mientras activa el otro.

5. En todos los osciloscopios de usos generales el disparo del barrido del eje X puede seleccionarse, al menos, entre “Modo automático” y “Modo normal”. En el modo normal, la base de tiempos se dispara cuando:

- (A) Hay señal presente en alguna de las entradas del eje Y.
- (B) El nivel de disparo está contenido entre el máximo y el mínimo de la señal de entrada.
- (C) Aunque no haya señal presente, se dispara mediante un pulso generado internamente.
- (D) El disparo se efectúa una vez, luego de lo cual se debe resetear la base de tiempos

6. Si Ud. va a emplear un osciloscopio para efectuar mediciones de tiempo de crecimiento de señales con flancos abruptos, necesita conocer el tiempo de crecimiento propio del osciloscopio, el cual puede calcularse a partir de la especificación de ancho de banda del mismo de la siguiente manera:

- (A) $T_{co}=AB \cdot 0,35$ (B) $T_{co}=0,35/AB$ (C) $T_{co}=AB /0,35$ (D) $T_{co}=(0,35 \cdot AB)^2$

7. Ud. esta empleando un osciloscopio cuyo ancho de banda es 10MHz para observar la forma de onda proporcionada por un generador de funciones cuya salida es de 50Ω y se encuentra ajustado para entregar una onda cuadrada cuya frecuencia es igual a 5MHz. Inicialmente usa un cable coaxial terminado en conectores BNC para unir el osciloscopio al generador, pero solo consigue ver una senoide. Para poder observar la onda cuadrada Ud. Debe:

- (A) Emplear una punta de pruebas con atenuador X10 previamente compensada.
- (B) Utilizar un circuito para adaptar los 50Ω del generador a $1M\Omega$ del osciloscopio.
- (C) No hay nada que Ud. pueda hacer para resolver el problema.
- (D) Emplear el nivel de salida mas elevado que pueda proporcionar el generador.

8. En un osciloscopio de doble trazo La presentación dual se logra mediante el empleo de una llave electrónica que actúa sobre los circuitos del eje vertical; esta llave puede trabajar en modo "Barrido alternado" (Alt.) o "Barrido troceado" (Troc.). Relacione cada uno de los modos, con las características que se listan:

- (A) Se emplea cuando la velocidad de barrido es elevada.
- (B) Se emplea cuando la velocidad de barrido es baja.
- (D) Dentro de cada ciclo de barrido se va alternado cada uno de los canales.
- (E) En un barrido se muestra un canal, y en el siguiente el otro.

9. Supóngase que la velocidad máxima de muestreo de un osciloscopio digital de 40MHz es 200 Msa/sec; que la capacidad de memoria es de 2000 puntos de muestra; y que la base de tiempos puede ser ajustada entre 5seg./div y 2ns/div. ¿Cual es el valor de la base de tiempos para el cual el sistema emplea la máxima velocidad de muestreo y simultáneamente captura 2000 puntos de muestra?:

- (A) 10 μ s/div. (B) 1 μ s/div. (C) 5 seg./div. (D) 2 ns/div. (E) Otro:_____

Preguntas abiertas:

10. En todos los osciloscopios digitales se emplea un sistema de muestreo para digitalizar la señal de entrada. ¿Cuál es la diferencia entre "Muestreo en tiempo real" y "Muestreo repetitivo".

11. Cual es la diferencia entre las técnicas de muestreo repetitivo secuencial y muestreo repetitivo aleatorio que se emplean en los osciloscopios digitales?

12. En un osciloscopio con doble base de tiempos; ¿que significa: barrido "A" intensificado por "B" y barrido "B" retardado por "A"?

13. De que depende el limite superior en cuanto al ancho de banda de un osciloscopio digital?

14. Cuales son los factores que limitan el ancho de banda de un osciloscopio convencional y que han conducido a la necesidad de implementar osciloscopios de muestreo?