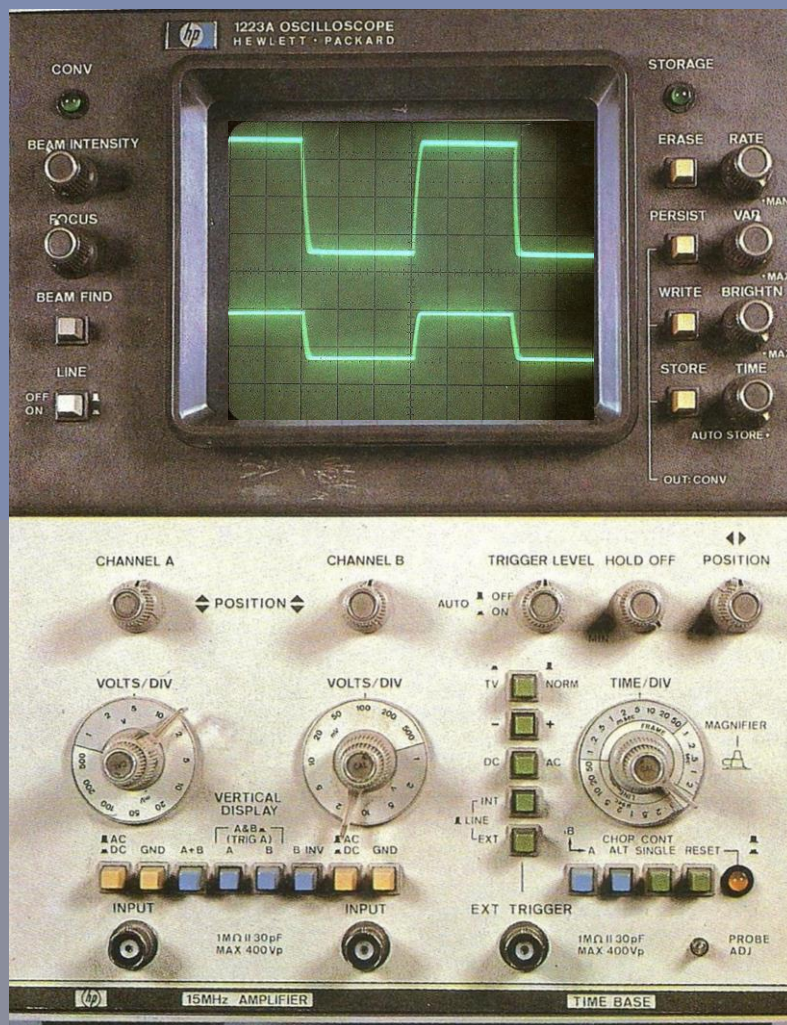
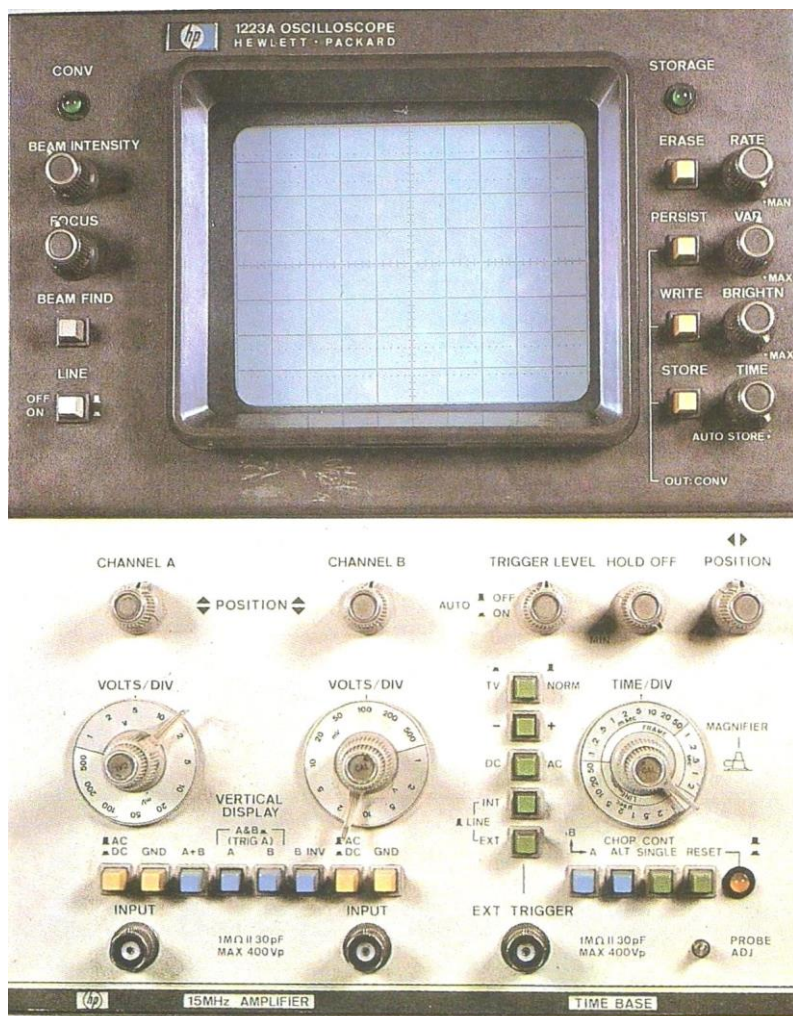


EL OSCILOSCOPIO



by My Electronic

EL OSCILOSCOPIO



Osciloscopio de doble canal de 15MHZ de la marca HEWLETT PACKARD.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Introducción (5)

Funciones principales del osciloscopio (7)

Empleo del osciloscopio (10)

Formas de ondas que muestra un osciloscopio (10)

Parámetros que influyen en la calidad de un osciloscopio (13)

Las sondas de medida (16)

Medidas de la señal con el osciloscopio (18)

Estructura básica (24)

Generación y movimiento del haz catódico (28)

Amplificadores internos (32)

Características (32)

Atenuadores (33)

Ancho de banda (34)

Base de tiempos (35)

Las figuras de Lissajous (38)

Osciloscopios de dos canales (39)

Conmutación electrónica (40)

Combinaciones entre los canales (42)

Sincronización (43)

Nivel de disparo (45)

Modulación en intensidad (46)

Osciloscopios de memoria (47)

Tubos de persistencia variable (47)

Elementos adicionales (48)

Electrodo de memoria (49)

Controles externos (51)

Memoria digital (52)

Calibración de osciloscopios (52)

Ejemplos de medición con un osciloscopio HAMEG (53)

Introducción

El **osciloscopio** es uno de los instrumentos de medida de los llamados universales, ya que su campo de aplicación es amplísimo, pasando de ser un instrumento casi exclusivamente de laboratorio de investigación y desarrollo a constituir un valioso auxiliar en otros trabajos de tipo eléctrico o electrónico e incluso en otros sectores ajenos a estas áreas tecnológicas.

El uso de un osciloscopio dentro del mundo de la electricidad y la electrónica está muy extendido por las facilidades que ofrece para comprobar los cambios que ocurren en la señal de un circuito a medida que avanza el tiempo. Para ello, los osciloscopios son capaces de registrar frecuencias que van desde 0 Hz hasta muchos MHz, en función del tipo de equipo y el nivel profesional que posea.

El osciloscopio nos permite detectar los fallos en los circuitos eléctricos para determinar averías en cada etapa y solucionar los problemas.

Hay osciloscopios portátiles y de laboratorio. Se clasifican en **analógicos** y **digitales**. Con los osciloscopios analógicos es más difícil trabajar porque debemos combinar los valores de la perilla de los controles por eso se dificulta la lectura. Con los osciloscopios digitales muestran los valores de voltajes, frecuencia, voltaje pico-pico en la pantalla facilitando los trabajos.

Los **osciloscopios analógicos**, que se describe ampliamente en este documento, poseen un tubo de rayos catódicos que consta de tres partes fundamentales, encerrados en un tubo de vidrio y con un vacío elevado:

- 1) Cañón de electrones
- 2) Dispositivos de desviación de electrones
- 3) Pantalla.

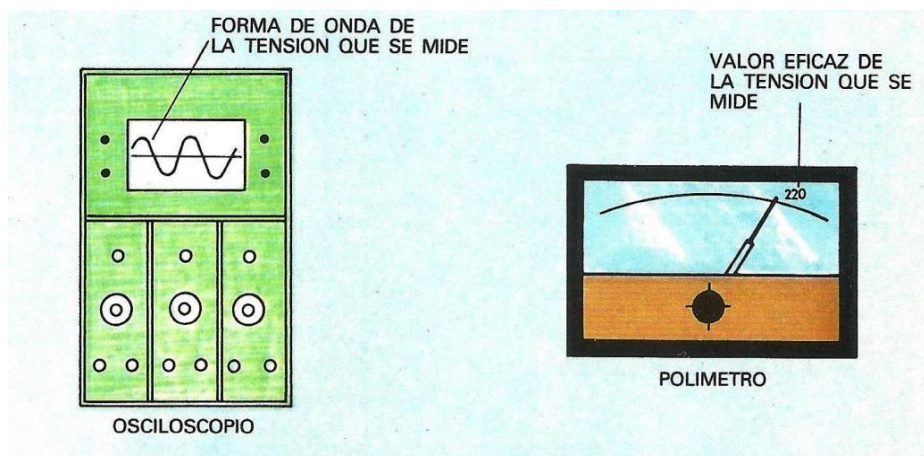
Esta tensión es producida mediante un circuito oscilador apropiado y su frecuencia puede ajustarse dentro de un amplio rango de valores, lo que permite adaptarse a la frecuencia de la señal a medir. A esto se le denomina **base de tiempos**.

Para la visualización de la información, el osciloscopio utiliza un eje de coordenadas cartesianas con la **línea horizontal (X)** y la **línea vertical (Y)**, para dar como resultado una onda variable en función a las condiciones del circuito a estudiar. A la onda que se consigue mostrar en la pantalla se le conoce en el mundo electrónico como oscilograma.

La principal ventaja del osciloscopio respecto a otros instrumentos de medida es que permite **visualizar** las formas de variación con el tiempo de las señales que se apliquen a sus entradas, además de sus niveles de tensión o de corriente en cualquiera de los puntos de su recorrido. Por ello, la principal finalidad de un osciloscopio es medir y visualizar la tensión en función de tiempo.

El **polímetro**, ya sea de tipo analógico o digital informará únicamente de los valores de tensiones medias o eficaces, ya que su forma de trabajo le impide seguir punto a punto la señal que se le aplica, sin embargo, el osciloscopio sí es capaz de seguirla constantemente aunque se trate de fenómenos de muy corta duración del orden de microsegundos.

De todo lo expuesto no debe deducirse que un osciloscopio invalide por completo al polímetro, ya que en la práctica ambos instrumentos se complementan, destinándose éste último a realizar medidas de tensiones y corrientes continuas o alternas cuya forma de variación en el tiempo sea conocida y a determinar valores de resistencia, debido a que en estos campos aventaja al osciloscopio por su menor tamaño y facilidad de utilización, aplicándose éste al resto de las comprobaciones que deban realizarse en el circuito en las que sea un factor primordial la observación de la forma de onda.



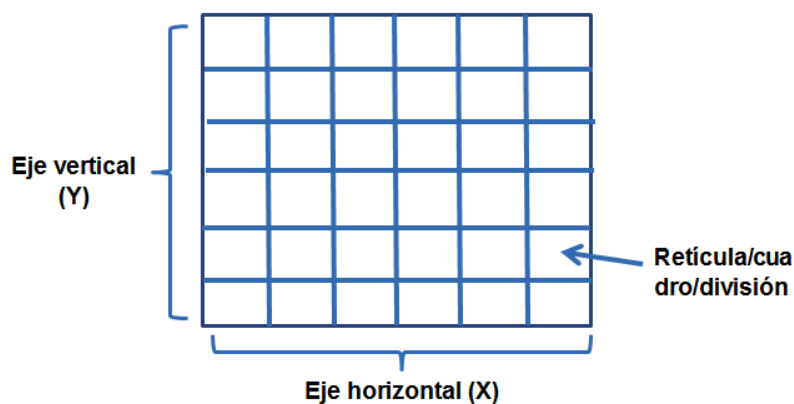
El osciloscopio es un instrumento basado en la visualización de la forma de onda de la tensión que se mide en función del tiempo; en amplitud y frecuencia. El polímetro es un instrumento de medida del valor eficaz de la tensión que se mida.

Funciones principales del osciloscopio

La finalidad principal del osciloscopio es medir y mostrar la tensión y frecuencia de una determinada onda eléctrica.

Los osciloscopios comprueban y muestran las señales de tensión como formas de onda y como representaciones visuales de la variación de tensión en función del tiempo.

Las señales se representan en un gráfico, que muestra cómo cambia la señal. El eje **vertical (Y)** representa la medición de la tensión, y el eje **horizontal (X)** representa el tiempo.



La función de **muestreo** es el proceso de convertir una parte de una señal de entrada en un número de valores eléctricos discretos con el propósito de almacenarla, procesarla y visualizarla. Por lo que se basa en recoger los datos para la formación de la señal que se visualizará en la pantalla. La magnitud de cada punto de muestreo es igual a la amplitud de la señal de entrada en el momento en que la señal es muestreada. Esta es la función primaria y la que aporta mayor cantidad de datos al momento de su uso. Con esta función el usuario estará en capacidad de recoger la mayor cantidad de información posible para el trabajo que está realizando.

La función de **disparo**. Esta se divide en tres alternativas y una de las más útiles es la de disparo único. A través de ella el usuario tendrá la capacidad de establecer una cierta cantidad de condiciones que deberán cumplirse en el circuito de estudio para que el osciloscopio produzca el disparo de forma automática. También está el disparo por flanco para valorar un punto específico de la señal y el de ancho de pulso que se utiliza en caso de señales muy complejas.

Como se ha comentado anteriormente la función principal de un osciloscopio es medir y visualizar una determinada señal u onda eléctrica, para ello, existen dos medidas fundamentales en un osciloscopio:

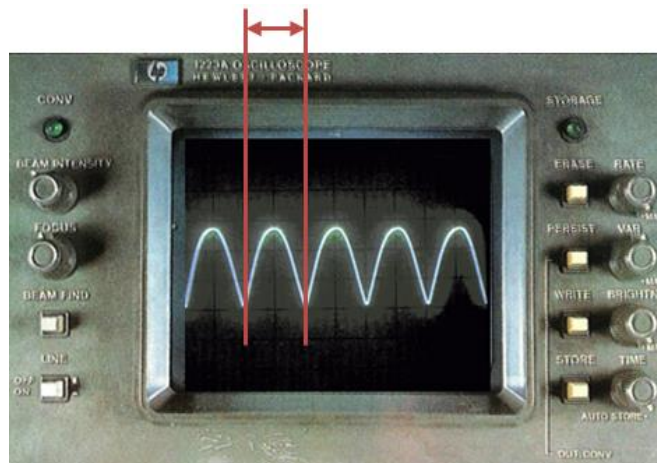
1. El periodo y frecuencia
2. El voltaje o amplitud de la onda eléctrica que se está midiendo.

Medida de Frecuencia

Si una señal se repite en el tiempo, posee una frecuencia (f). La frecuencia se mide en Hertz (Hz) y es igual al número de veces que la señal se repite en un segundo, es decir, 1Hz equivale a 1 ciclo por segundo. La frecuencia de una señal se define como la inversa del período: $f = 1/T$.

Una señal repetitiva también posee otro parámetro: el periodo, definiéndose como el tiempo que tarda la señal en completar un ciclo. Período y frecuencia son recíprocos el uno del otro.

En el osciloscopio el periodo se obtiene multiplicando el número de cuadros horizontales que se completa una onda por el valor seleccionado en la base de tiempos TIME/DIV en milisegundo o segundos. Obteniéndose la frecuencia con el inverso del periodo obtenido.

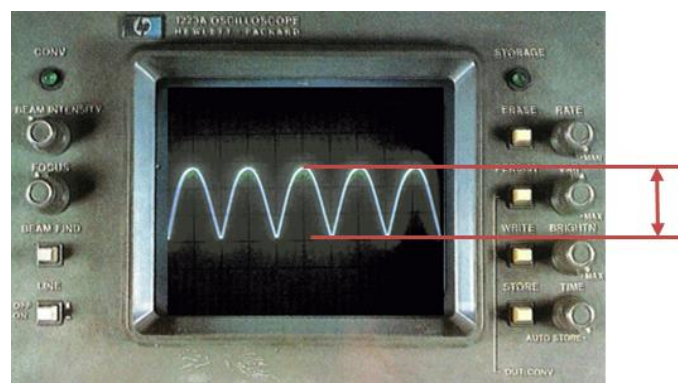


1 (cuadro horizontal) x 0,5 mseg/división = 2 KHz.

Medida de Voltaje

Voltaje es la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos de un circuito. Normalmente uno de esos puntos suele ser masa (GND, 0V), pero no siempre, por ejemplo se puede medir el voltaje pico a pico de una señal (Vpp) como la diferencia entre el valor máximo y mínimo de esta. La palabra amplitud significa generalmente la diferencia entre el valor máximo de una señal y masa.

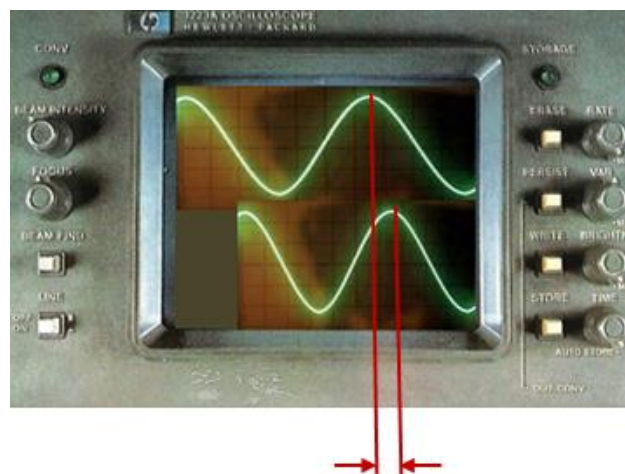
La amplitud o voltaje de una onda se obtiene multiplicando los cuadros verticales que ocupa dicha onda por el valor seleccionado en el selector de VOLTS/DIV, en milivoltios o voltios, en cuyo resultado será en milivoltios o voltios.



2 (cuadros verticales) x 500mV por división = 1 voltio

Fase

Por otro lado, la fase es otro parámetro que se visualiza en dos ondas iguales cuando realmente están desfasadas. Se puede explicar mucho mejor si consideramos la forma de onda senoidal. La onda senoidal se puede extraer de la circulación de un punto sobre un círculo de 360°. Un ciclo de la señal senoidal abarca los 360°. Cuando se comparan dos señales senoidales de la misma frecuencia puede ocurrir que ambas no estén en fase, o sea, que no coincidan en el tiempo los pasos por puntos equivalentes de ambas señales. En este caso se dice que ambas señales están desfasadas.



Empleo del osciloscopio

El osciloscopio se emplea generalmente para:

1. **Observar y medir señales:** con un voltímetro solo se obtienen valores fríos 10V-15V pero el osciloscopio nos indica el estado de la señal.
2. **Localizar fallos fácilmente:** podemos mirar cada una de las etapas del circuito, hasta encontrar la etapa o circuito donde se encuentra la falla.
3. **Medir corriente directa:** salida de fuente o alimentación, pilas o baterías donde podemos monitorear la señal.
4. **Medir voltaje de pico a pico de un amplificador:**
5. **Ganancia de salida:** midiendo la señal de salida y entrada utilizando una operación matemática, para verificar si el amplificador está trabajando de manera correcta para la ganancia para la cual fue diseñada.
6. **Medición de pérdida:** En una línea de transmisión podemos medir la pérdida que puede sufrir lo largo del cable.
7. **Ancho de banda:** De que frecuencia mínima o máxima está trabajando, midiendo los valores de ruidos que estas señales.
8. **Nivel de Ruido:** en el osciloscopio tiene la pantalla donde se muestran los oscilogramas, son formas de onda de como se está registrando el medidor.

Formas de ondas que muestra un osciloscopio

Existe un término general para describir un patrón que se repite en el tiempo: **onda**. Existen ondas de sonido, ondas oceánicas, ondas cerebrales y por supuesto, ondas de tensión. Un osciloscopio mide estas últimas. Un ciclo es la mínima parte de la onda que se repite en el tiempo. Una forma de onda es la representación gráfica de una onda. Una forma de onda de tensión siempre se presentará con el tiempo en el eje **horizontal (X)** y la amplitud en el eje **vertical (Y)**.

La forma de onda nos proporciona una valiosa información sobre la señal. En cualquier momento podemos visualizar la altura que alcanza y, por lo tanto, saber si el voltaje ha cambiado en el tiempo (si observamos, por ejemplo, una línea horizontal podremos concluir que en ese intervalo de tiempo la señal es constante).

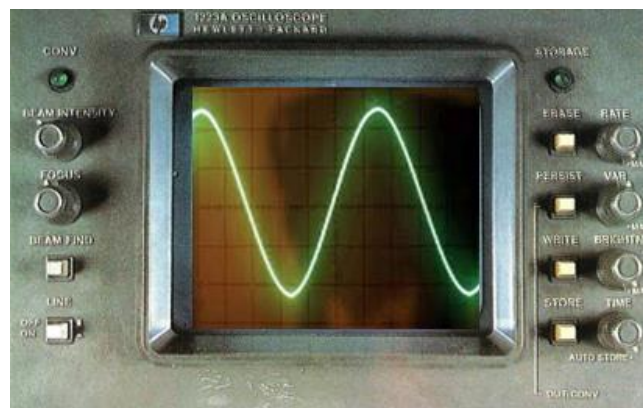
Con la pendiente de las líneas diagonales, tanto en flanco de subida como en flanco de bajada, podremos conocer la velocidad en el paso de un nivel a otro, pueden observarse también cambios repentinos de la señal (ángulos muy agudos) generalmente debidos a procesos transitorios.

Las formas de ondas se pueden clasificar en cuatro tipos:

1. Ondas senoidales
2. Ondas cuadradas y rectangulares
3. Ondas triangulares y en diente de sierra.
4. Pulsos y flancos ó escalones.

Ondas senoidales

Son las ondas fundamentales y eso por varias razones: Poseen unas propiedades matemáticas muy interesantes (por ejemplo con combinaciones de señales senoidales de diferente amplitud y frecuencia se puede reconstruir cualquier forma de onda), la señal que se obtiene de las tomas de corriente de cualquier casa tienen esta forma, las señales de test producidas por los circuitos osciladores de un generador de señal son también senoidales, la mayoría de las fuentes de potencia en AC (corriente alterna) producen señales senoidales.

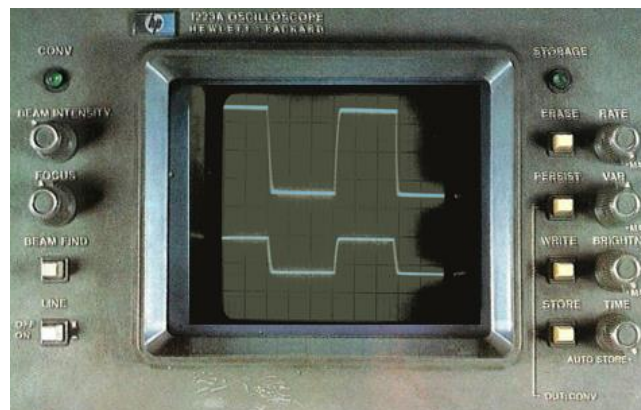


Detalle de una onda senoidal.

La señal senoidal amortiguada es un caso especial de este tipo de ondas y se producen en fenómenos de oscilación, pero que no se mantienen en el tiempo.

Ondas cuadradas y rectangulares

Las ondas cuadradas son básicamente ondas que pasan de un estado a otro de tensión, a intervalos regulares, en un tiempo muy reducido. Son utilizadas usualmente para probar amplificadores (esto es debido a que este tipo de señales contienen en sí mismas todas las frecuencias). La televisión, la radio y los ordenadores utilizan mucho este tipo de señales, fundamentalmente como relojes y temporizadores.

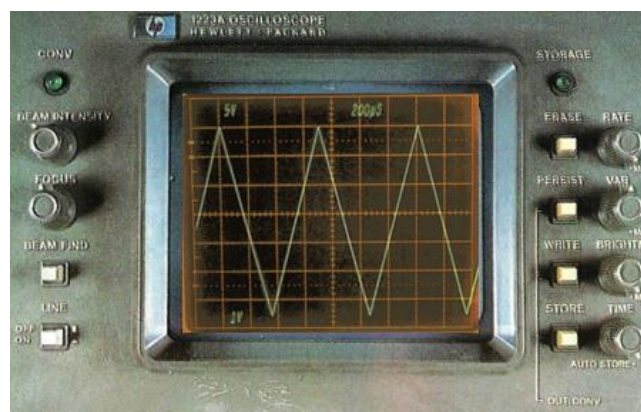


Detalle de ondas cuadradas, con diferente amplitud.

Las ondas rectangulares se diferencian de las cuadradas en no tener iguales los intervalos en los que la tensión permanece a nivel alto y bajo. Son particularmente importantes para analizar circuitos digitales.

Ondas triangulares y en diente de sierra

Se producen en circuitos diseñados para controlar voltajes linealmente, como pueden ser, por ejemplo, el barrido horizontal de un osciloscopio analógico ó el barrido tanto horizontal como vertical de una televisión. Las transiciones entre el nivel mínimo y máximo de la señal cambian a un ritmo constante. Estas transiciones se denominan rampas.

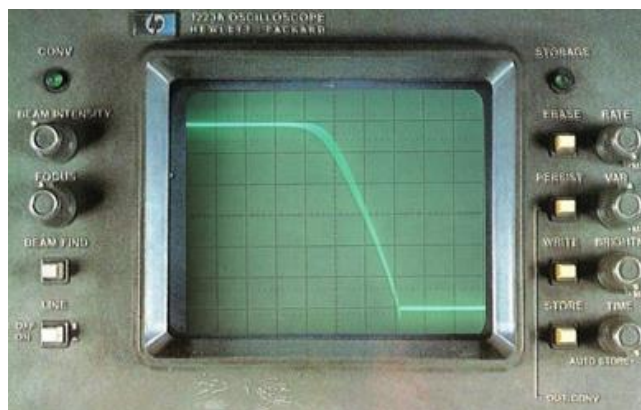


Detalle de una onda en diente de sierra.

La onda en **diente de sierra** es un caso especial de señal triangular con una rampa descendente de mucha más pendiente que la rampa ascendente.

Pulsos y flancos ó escalones

Señales, como los flancos y los pulsos, que solo se presentan una sola vez, se denominan señales transitorias. Un flanco ó escalón indica un cambio repentino en el voltaje, por ejemplo cuando se conecta un interruptor de alimentación. El pulso indicaría, en este mismo ejemplo, que se ha conectado el interruptor y en un determinado tiempo se ha desconectado. Generalmente el pulso representa un bit de información atravesando un circuito de un ordenador digital ó también un pequeño defecto en un circuito (por ejemplo un falso contacto momentáneo). Es común encontrar señales de este tipo en ordenadores, equipos de rayos X y de comunicaciones. La pulsación se define como 2π multiplicado por la frecuencia: $\omega = 2\pi f$.



Detalle de una señal por flanco de bajada en un determinado tiempo.

Parámetros que influyen en la calidad de un osciloscopio

Los términos definidos en esta sección nos permitirán comparar diferentes modelos de osciloscopio disponibles en el mercado.

❖ Número de entradas:

- Uno o dos canales de entrada de la señal a representar.
- Una entrada para disparo a partir de una señal exterior.
- En algunos modelos se dispone de una entrada adicional para ser utilizada en lugar de la **Base de tiempos**.

- ❖ **Impedancia de entrada:** Del orden de $1M\Omega$, aunque puede elevarse empleando sondas especiales.
- ❖ **Respuesta en frecuencia:** Variada según los modelos, desde 500KHz hasta 100MHz.
- ❖ **Sensibilidad vertical:** Indica la facilidad del osciloscopio para amplificar señales débiles. Se suele proporcionar en mV por división vertical, normalmente es del orden de 5 mV/div (llegando hasta 2 mV/div). Con ello se pueden representar señales con niveles comprendidos entre pocos milivoltios y decenas o centenas de voltios, aumentándose las posibilidades con el empleo de sondas atenuadoras.
- ❖ **Base de tiempos:** Permite representar señales o porciones de señal con tiempos seleccionados entre fracciones de microsegundo y varios segundos.
- ❖ **Memoria:** Algunos modelos de osciloscopio ofrecen la posibilidad de imagen con persistencia.
- ❖ **Ancho de Banda:** Especifica el rango de frecuencias en las que el osciloscopio puede medir con precisión. Por convenio el ancho de banda se calcula desde 0Hz (continua) hasta la frecuencia a la cual una señal de tipo senoidal se visualiza a un 70.7% del valor aplicado a la entrada (lo que corresponde a una atenuación de 3dB).
- ❖ **Tiempo de subida:** Es otro de los parámetros que nos dará, junto con el anterior, la máxima frecuencia de utilización del osciloscopio. Es un parámetro muy importante si se desea medir con fiabilidad pulsos y flancos (recordar que este tipo de señales poseen transiciones entre niveles de tensión muy rápidas). Un osciloscopio no puede visualizar pulsos con tiempos de subida más rápidos que el suyo propio.
- ❖ **Velocidad:** Para osciloscopios analógicos esta especificación indica la velocidad máxima del barrido horizontal, lo que nos permitirá observar sucesos más rápidos. Suele ser del orden de nanosegundos por división horizontal.
- ❖ **Exactitud en la ganancia:** Indica la precisión con la cual el sistema vertical del osciloscopio amplifica ó atenúa la señal. Se proporciona normalmente en porcentaje máximo de error.
- ❖ **Exactitud de la base de tiempos:** Indica la precisión en la base de tiempos del sistema horizontal del osciloscopio para visualizar el tiempo. También se suele dar en porcentaje de error máximo.
- ❖ **Velocidad de muestreo:** En los osciloscopios digitales indica cuantas muestras por segundo es capaz de tomar el sistema de adquisición de datos (específicamente el conversor A/D). En los osciloscopios de calidad se llega a velocidades de muestreo de Megamuestras/sg. Una velocidad de muestreo grande es importante para poder visualizar pequeños periodos de tiempo.

En el otro extremo de la escala, también se necesita velocidades de muestreo bajas para poder observar señales de variación lenta. Generalmente la velocidad de muestreo cambia al actuar sobre el mando TIMEBASE para mantener constante el número de puntos que se almacenaran para representar la forma de onda.

- ❖ **Resolución vertical:** Se mide en bits y es un parámetro que nos da la resolución del conversor A/D del osciloscopio digital. Nos indica con que precisión se convierten las señales de entrada en valores digitales almacenados en la memoria. Técnicas de cálculo pueden aumentar la resolución efectiva del osciloscopio.
- ❖ **Longitud del registro:** Indica cuantos puntos se memorizan en un registro para la reconstrucción de la forma de onda. Algunos osciloscopios permiten variar, dentro de ciertos límites, este parámetro. La máxima longitud del registro depende del tamaño de la memoria de que disponga el osciloscopio. Una longitud del registro grande permite realizar zooms sobre detalles en la forma de onda de forma muy rápida (los datos ya han sido almacenados), sin embargo esta ventaja es a costa de consumir más tiempo en muestrear la señal completa.
- ❖ **Poner a tierra:** Una buena conexión a tierra es muy importante para realizar medidas con un osciloscopio.
- ❖ **Colocar a tierra el Osciloscopio:** Por seguridad es obligatorio colocar a tierra el osciloscopio. Si se produce un contacto entre un alto voltaje y la carcasa de un osciloscopio no puesto a tierra, cualquier parte de la carcasa, incluidos los mandos, puede producirle un peligroso shock. Mientras que un osciloscopio bien colocado a tierra, la corriente, que en el anterior caso te atravesaría, se desvía a la conexión de tierra.

Para conectar a tierra un osciloscopio se necesita unir el chasis del osciloscopio con el punto de referencia neutro de tensión (comúnmente llamado tierra). Esto se consigue empleando cables de alimentación con tres conductores (dos para la alimentación y uno para la toma de tierra).

El osciloscopio necesita, por otra parte, compartir la misma masa con todos los circuitos bajo prueba a los que se conecta.

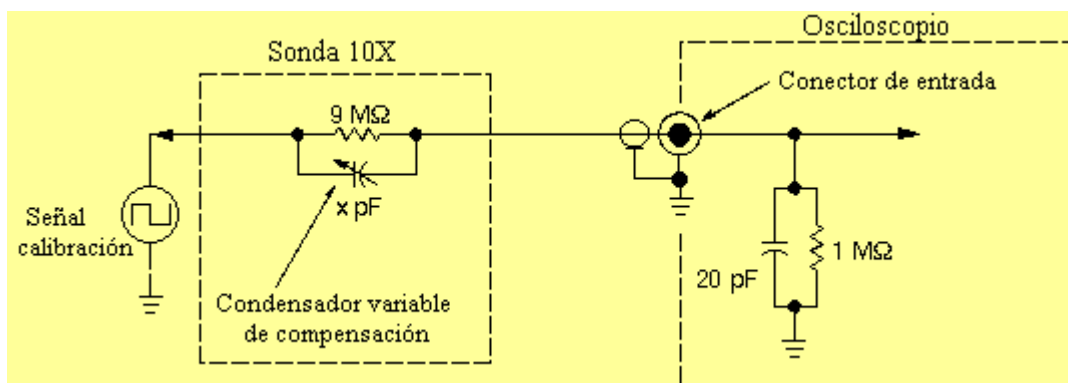
Algunos osciloscopios pueden funcionar a diferentes tensiones de red y es muy importante asegurarse que está ajustado a la misma de la que disponemos en las tomas de tensión.

- ❖ **Ponerse a tierra uno mismo:** Si se trabaja con circuitos integrados (ICs), especialmente del tipo CMOS, es necesario colocarse a tierra uno mismo. Esto es debido a que ciertas partes de estos circuitos integrados son susceptibles de estropearse con la tensión estática que almacena nuestro propio cuerpo. Para resolver este problema se puede emplear una correa conductora que se conectará debidamente a tierra, descargando la electricidad estática que posea su cuerpo.

Las sondas de medida

Es muy importante utilizar las sondas diseñadas para trabajar específicamente con el osciloscopio. Una sonda no es, ni mucho menos, un cable con una pinza, sino que es un conector específicamente diseñado para evitar ruidos que puedan perturbar la medida.

Además, las sondas se construyen para que tengan un efecto mínimo sobre el circuito de medida. Esta facultad de la sondas recibe el nombre de efecto de carga, para minimizarla se utiliza un atenuador pasivo, generalmente de x10.



Este tipo de sonda se proporciona generalmente con el osciloscopio y es una excelente sonda de utilización general. Para otros tipos de medidas se utilizan sondas especiales, como pueden ser las sondas de corriente ó las activas.

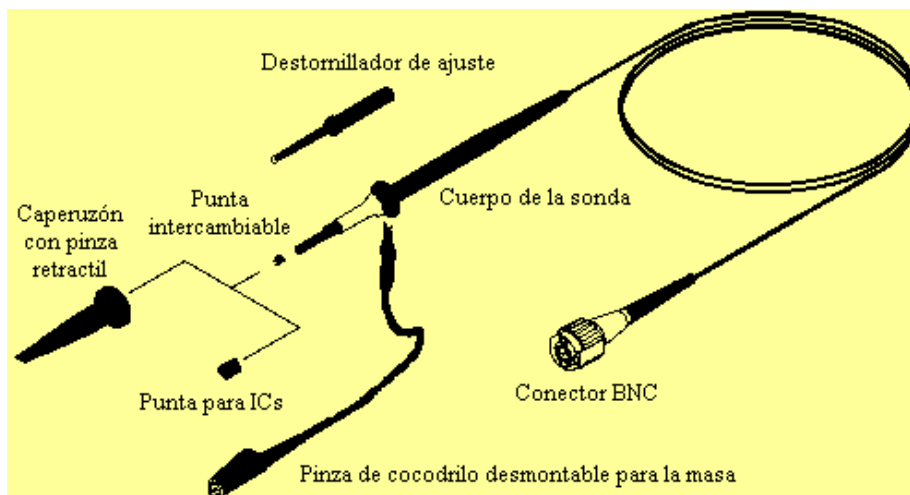


Sonda de medidas para osciloscopio.

Sondas pasivas

La mayoría de las sondas pasivas están marcadas con un factor de atenuación, normalmente 10X ó 100X. Por convenio los factores de atenuación aparecen con el signo X detrás del factor de división. En contraste los factores de amplificación aparecen con el signo X delante (X10 ó X100).

La sonda más utilizada posiblemente sea la 10X, reduciendo la amplitud de la señal en un factor de 10. Su utilización se extiende a partir de frecuencias superiores a 5 kHz y con niveles de señal superiores a 10 mV. La sonda 1X es similar a la anterior pero introduce más carga en el circuito de prueba, pero puede medir señales con menor nivel. Por comodidad de uso se han introducido sondas especiales con un conmutador que permite una utilización 1X ó 10X. Cuando se utilicen este tipo de sondas hay que asegurarse de la posición de este conmutador antes de realizar una medida.



Sondas activas

Proporcionan una amplificación antes de aplicar la señal a la entrada del osciloscopio. Pueden ser necesarias en circuitos con una cargabilidad de salida muy baja. Este tipo de sondas necesitan para operar una fuente de alimentación.

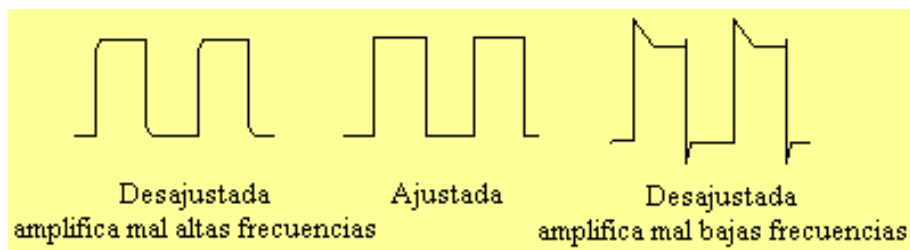
Sondas de corriente

Posibilitan la medida directa de las corrientes en un circuito. Las hay para medida de corriente alterna y continua. Poseen una pinza que abarca el cable a través del cual se desea medir la corriente. Al no situarse en serie con el circuito causan muy poca interferencia en él.

Compensación de la sonda

Antes de utilizar una sonda atenuadora 10X es necesario realizar un ajuste en frecuencia para el osciloscopio en particular sobre el que se vaya a trabajar. Este ajuste se denomina compensación de la sonda y consta de los siguientes 5 pasos.

1. Conectar la sonda a la entrada del canal 1
2. Conectar la punta de la sonda al punto de señal de compensación (La mayoría de los osciloscopios disponen de una toma para ajustar las sondas, en caso contrario será necesario utilizar un generador de onda cuadrada).
3. Conectar la pinza de cocodrilo de la sonda a masa.
4. Observar la señal cuadrada de referencia en la pantalla.
5. Con el destornillador de ajuste, actuar sobre el condensador de ajuste hasta observar una señal cuadrada perfecta.



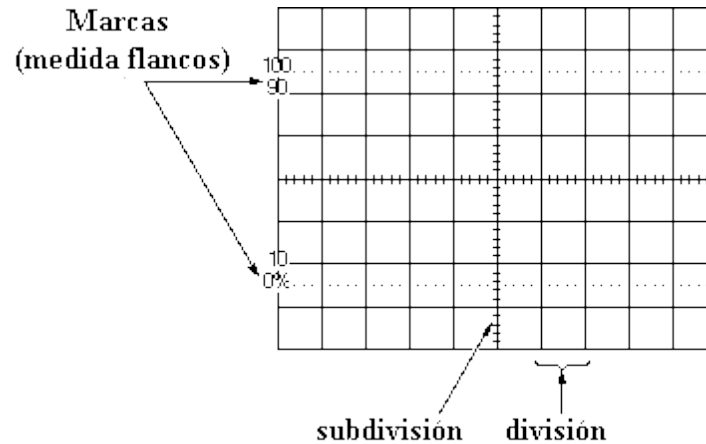
Medidas de la señal con el osciloscopio

Las dos medidas más básicas que se pueden realizar con un osciloscopio son el **voltaje** (amplitud) y el **tiempo** (frecuencia), al ser medidas directas.

La pantalla

En la siguiente figura se representa la pantalla de un osciloscopio. Deberás notar que existen unas marcas en la pantalla que la dividen tanto en **vertical** como en **horizontal**, formando lo que se denomina **retícula** o rejilla. La separación entre dos líneas consecutivas de la rejilla constituye lo que se denomina una **división** o cuadro.

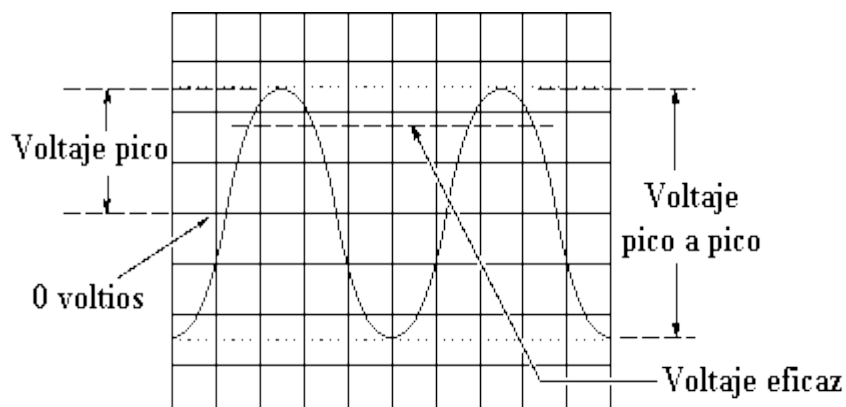
Normalmente la rejilla posee 10 divisiones horizontales por 8 verticales del mismo tamaño (cercano al cm), lo que forma una pantalla más ancha que alta. En las líneas centrales, tanto en horizontal como en vertical, cada división o cuadro posee unas marcas que la dividen en 5 partes iguales (utilizadas para afinar las medidas).



Medidas de voltajes

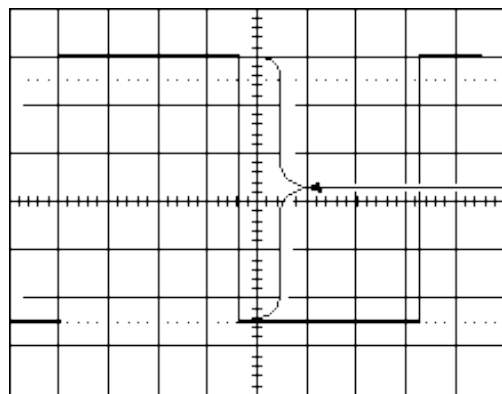
Generalmente cuando hablamos de voltaje queremos realmente expresar la diferencia de potencial eléctrico, expresado en voltios, entre dos puntos de un circuito. Pero normalmente uno de los puntos está conectado a masa (0 voltios) y entonces simplificamos hablando del voltaje en el punto A (cuando en realidad es la diferencia de potencial entre el punto A y GND). Los voltajes pueden también medirse de pico a pico (entre el valor máximo y mínimo de la señal). Es muy importante que especifiquemos al realizar una medida que tipo de voltaje estamos midiendo.

El osciloscopio es un instrumento para medir el voltaje de forma directa. Otras medidas se pueden realizar a partir de esta por simple cálculo (por ejemplo, la de la intensidad o la potencia). Los cálculos para señales de corriente alterna pueden ser complicados, pero siempre el primer paso para medir otras magnitudes es empezar por el voltaje.



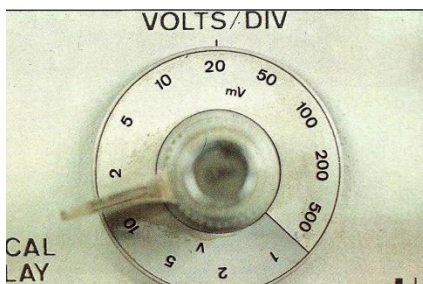
En la figura anterior se ha señalado el valor de pico V_p , el valor de pico a pico V_{pp} , normalmente el doble de V_p y el valor eficaz V_{ef} o V_{RMS} (*root-mean-square*, es decir la raíz de la media de los valores instantáneos elevados al cuadrado) utilizada para calcular la potencia de la señal de corriente alterna.

Para realizar la medida de voltajes con un osciloscopio, simplemente se trata de contar el número de divisiones verticales que ocupa la señal en la pantalla. Ajustando la señal con el mando de posicionamiento horizontal podemos utilizar las subdivisiones de la rejilla para realizar una medida más precisa (recuerda que una subdivisión equivale generalmente a 1/5 de lo que represente una división completa). Es importante que la señal ocupe el máximo espacio de la pantalla para realizar medidas fiables, para ello actuaremos sobre el conmutador del amplificador vertical.

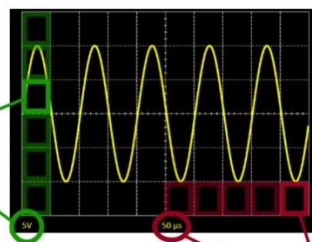


Utiliza la línea vertical central para obtener precisión

Ésta corresponde a la medida de amplitud (tensión) debiendo utilizar el botón de la escala vertical **VOLTS/DIV** del osciloscopio. Cada división vertical representa el valor en milivoltios o voltios seleccionado en el conmutador. Esta función hace que el mínimo de la señal coincida con la línea más baja de la pantalla y con el botón posición horizontal mueve la señal hasta que su máximo se sitúe en la regla vertical.



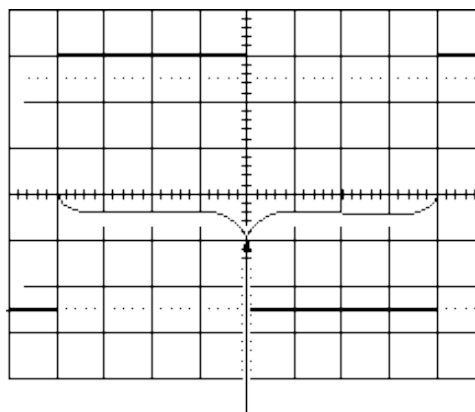
Si la escala vertical es de 5V/div, cada cuadrado vertical representará 5V



Si la escala horizontal es de 50µs/div, cada cuadrado horizontal representará 50µs

Medida de tiempo y frecuencia

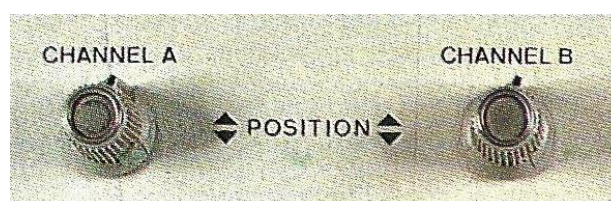
Para realizar medidas de tiempo se utiliza la escala horizontal del osciloscopio. Esto incluye la medida de periodos, anchura de impulsos y tiempo de subida y bajada de impulsos. La frecuencia es una medida indirecta y se realiza calculando la inversa del periodo. Al igual que ocurría con los voltajes, la medida de tiempos será más precisa si el tiempo a objeto de medida ocupa la mayor parte de la pantalla, para ello actuaremos sobre el **conmutador de la base de tiempos**. Si centramos la señal utilizando el mando de **posicionamiento vertical** podemos utilizar las subdivisiones para realizar una medida más precisa.



Utiliza la línea horizontal central
para obtener precisión

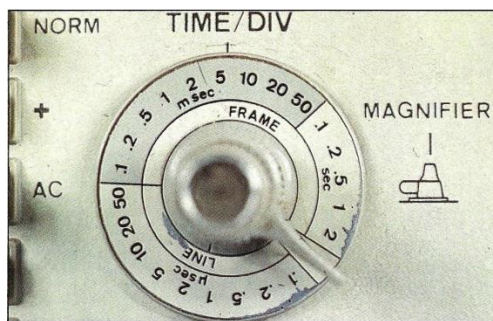
El **conmutador de la base de tiempos** trata de un conmutador con un gran número de posiciones, cada una de las cuales, representa el factor de escala empleado por el sistema de barrido horizontal. Por ejemplo si el mando está en la posición 1 msg/div significa que cada una de las divisiones horizontales de la pantalla (aproximadamente de un 1 cm.) representa 1 milisegundo. Las divisiones más pequeñas representaran una quinta parte de este valor, o sea, 200 μ sg.

El mando de **posicionamiento vertical** es un control que consta de un potenciómetro que permite mover verticalmente la señal hasta el punto exacto que se desee. Cuando se está trabajando con una sola señal el punto normalmente elegido suele ser el centro de la pantalla.

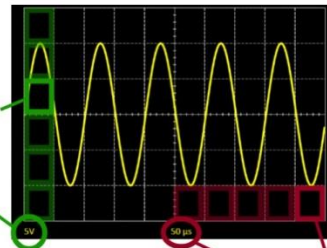


Potenciómetro de ajuste de la posición vertical

Para medir la frecuencia, que es el número de veces que se completa un ciclo de oscilación y se mide en hercios (Hz) (un hercio equivale a un ciclo por segundo) se debe utilizar el conmutador **TIME/DIV** del osciloscopio de la escala horizontal, cada división horizontal representa el valor seleccionado en el conmutador.



Si la escala vertical es de 5V/div, cada cuadrado vertical representará 5V

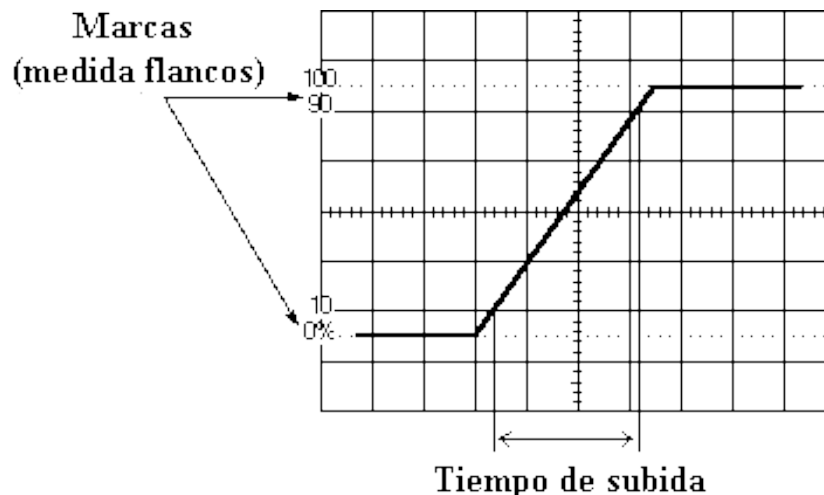


Si la escala horizontal es de 50µs/div, cada cuadrado horizontal representará 50µs

Medida de tiempos de subida y bajada en los flancos

En muchas aplicaciones es importante conocer los detalles de un pulso, en particular los tiempos de subida o bajada de estos.

Las medidas estándar en un pulso son su anchura y los tiempos de subida y bajada. El tiempo de subida de un pulso es la transición del nivel bajo al nivel alto de voltaje. Por convenio, se mide el tiempo entre el momento que el pulso alcanza el 10% de la tensión total hasta que llega al 90%. Esto elimina las irregularidades en las bordes del impulso. Esto explica las marcas que se observan en algunos osciloscopios (algunas veces simplemente unas líneas punteadas).



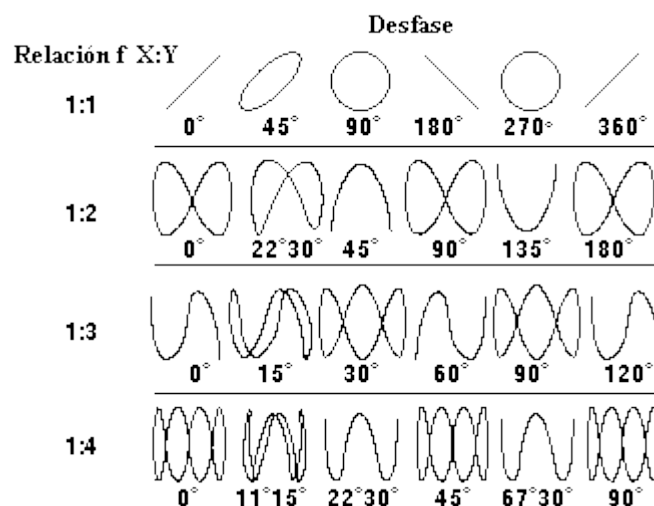
La medida en los pulsos requiere un fino ajuste en los mandos de disparo. Para convertirse en un experto en la captura de pulsos es importante conocer el uso de los mandos de disparo que posea nuestro osciloscopio. Una vez capturado el pulso, el proceso de medida es el siguiente: se ajusta actuando sobre el conmutador del amplificador vertical y el mando variable asociado hasta que la amplitud pico a pico del pulso coincida con las líneas punteadas (las señaladas como 0% y 100%). Se mide el intervalo de tiempo que existe entre que el impulso corta a la línea señalada como 10% y el 90%, ajustando el conmutador de la base de tiempos para que dicho tiempo ocupe el máximo de la pantalla del osciloscopio.

Medida del desfase entre señales

La sección horizontal del osciloscopio posee un control etiquetado como X-Y, que nos va a introducir en una de las técnicas de medida de desfase (la única que podemos utilizar cuando solo disponemos de un canal vertical en nuestro osciloscopio).

El periodo de una señal se corresponde con una fase de 360° . El desfase indica el ángulo de atraso o adelanto que posee una señal con respecto a otra (tomada como referencia) si poseen ambas el mismo periodo. Ya que el osciloscopio solo puede medir directamente los tiempos, la medida del desfase será indirecta.

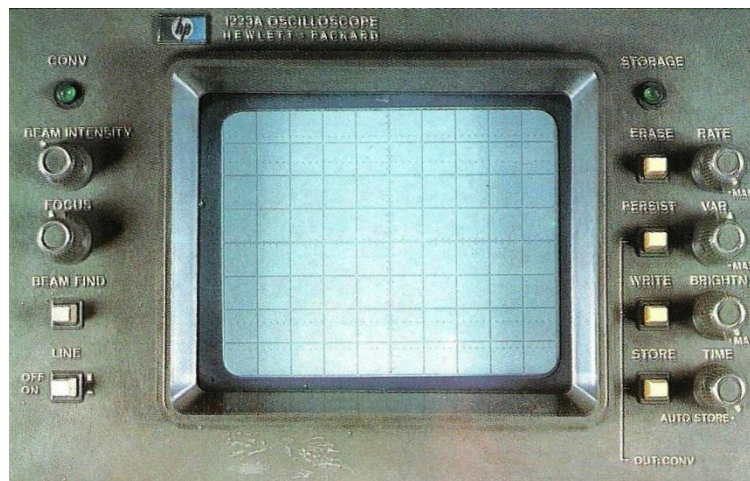
Uno de los métodos para medir el desfase es utilizar el modo X-Y. Esto implica introducir una señal por el canal vertical (generalmente el I) y la otra por el canal horizontal (el II). (este método solo funciona de forma correcta si ambas señales son senoidales). La figura resultante en pantalla se denomina figura de **Lissajous** (debido al físico francés denominado Jules Antoine Lissajous). Se puede deducir la fase entre las dos señales, así como su relación de frecuencias observando la siguiente figura.



Estructura básica

El elemento básico y fundamental de todo osciloscopio es la visualización de las señales mediante la pantalla de un tubo de rayos catódicos en los osciloscopios analógicos, en cuya pantalla se produce la representación de las señales. Más modernamente, se utilizan otros elementos menos pesados y con más prestaciones como son los construidos con pantallas LCD y circuitos digitales.

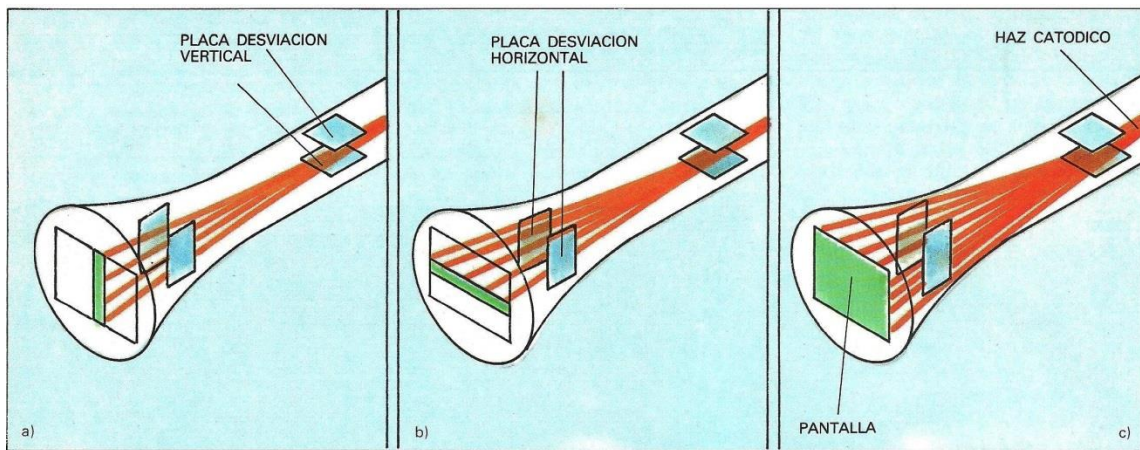
La forma de la pantalla de un osciloscopio de tubo de rayos catódicos, empezó siendo circular y la tendencia actual es cuadrada o rectangular con una superficie útil que suele tener unas dimensiones de 10 cm. de diámetro en el primer caso y de 10 x 10 cm. o 10 x 8 cm. en el segundo.



Detalle de la pantalla de un osciloscopio. Los mandos situados a ambos lados de la misma controlan las características de la imagen y la persistencia.

El osciloscopio posee un **sistema de deflexión** que está basado en un juego de cuatro placas desviadoras que funcionan por el procedimiento electrostático, es decir, por la aplicación sobre ellas de una tensión que ejerce sobre los electrones del haz una acción de atracción o repulsión según sea su polaridad. Estas placas se encuentran colocadas con sus planos paralelos dos a dos, unos en posición vertical y los otros horizontal a una distancia entre sí que depende de la geometría del tubo.

Las placas **verticales** son las encargadas de realizar la deflexión horizontal mientras que las **horizontales** moverán el rayo electrónico verticalmente. El fenómeno de la deflexión requiere de la aplicación de tensiones altas sobre las placas, tanto horizontales como verticales.



Sistema de deflexión de un osciloscopio del tipo electrostático. a) Al aplicar una tensión sobre las placas de verticales aparece una línea vertical. b) Lo mismo sucede con las placas de horizontal, apareciendo una línea horizontal. c) Si se aplica la tensión a los dos pares de placas se podrá llevar el haz a cualquier punto de la pantalla.

Las tensiones que se aplican a las placas en posición vertical, denominadas **horizontales** por producir este movimiento, están generadas por un circuito denominado de **Base de tiempos**, aunque también es posible aplicar una señal exterior, a través de una entrada especial, que convenientemente amplificada alcanza el tubo.

Por lo tanto, la función que realiza el circuito de **Base de tiempos** es producir la señal necesaria para excitar el barrido horizontal. El tiempo de barrido puede ser seleccionado desde el exterior con objeto de adaptar a la frecuencia de la señal que se desea observar.

Las tensiones aplicadas a las placas verticales provienen de la señal que se desea visualizar, a través de un amplificador interno que recibe la señal del exterior y las eleva al nivel suficiente. Puesto que el osciloscopio debe de admitir formas de onda de muy variada amplitud, la ganancia de este amplificador debe de poderse variar dentro de una amplia gama de posibilidades.

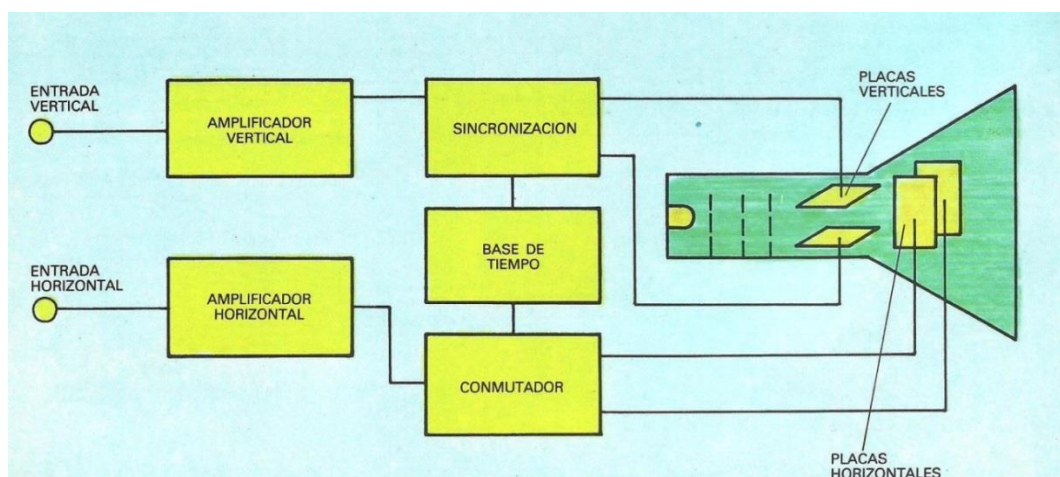
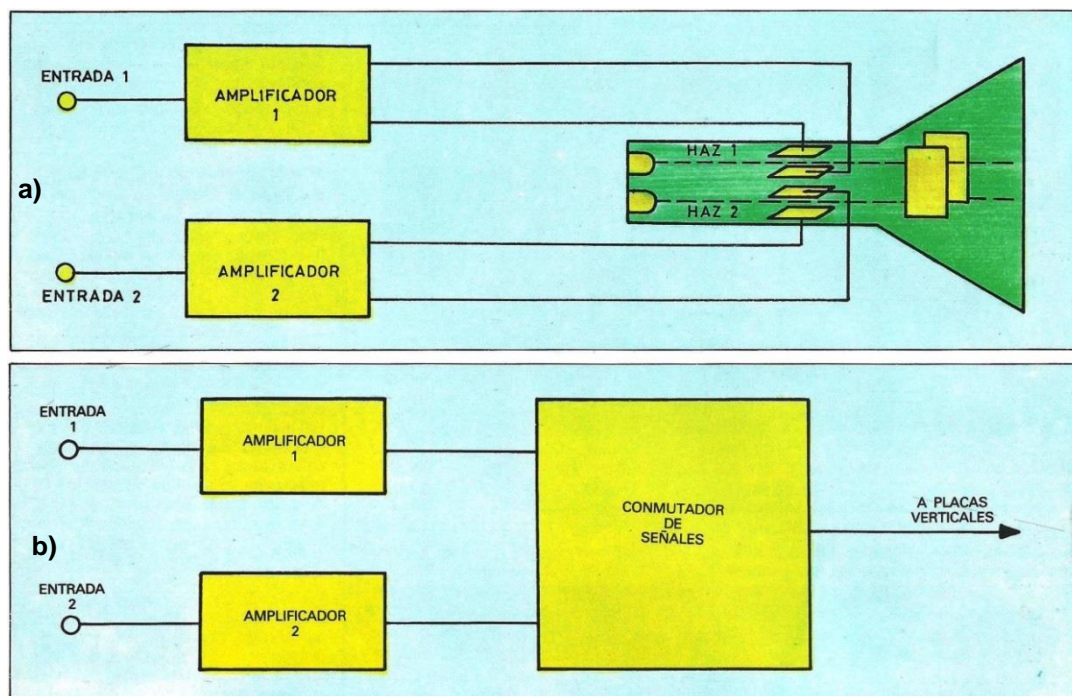


Diagrama de bloques, muy simplificado, de un osciloscopio.

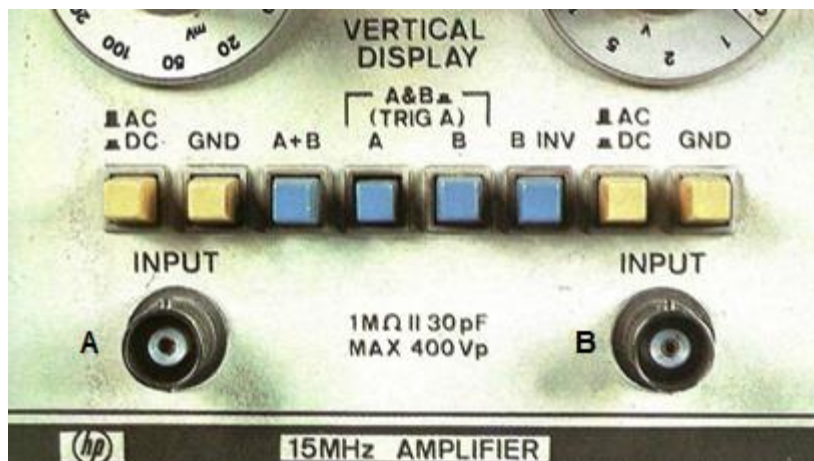
Es necesario también que exista una cierta correlación entre la señal que se desea observar y el circuito de la **Base de tiempos** para conseguir que los sucesivos barridos horizontales encuentren los mismos puntos de la forma de onda en el origen y en el resto de la pantalla y producir así una presentación totalmente estática, ya que en caso contrario se observaría una imagen en constante movimiento y sería imposible realizar ningún análisis de la misma. Esto se logra merced a un circuito de **sincronización** o de **disparo (trigger)** cuya forma de trabajo puede elegirse exteriormente y hacer que sea interno, a partir de la señal aplicada para realizar la medida o externo mediante una señal exterior utilizada exclusivamente para esta finalidad.

Por lo tanto, el circuito de sincronización o de **disparo (trigger)** sirve para que los sucesivos barridos horizontales encuentren, durante su recorrido, los mismos puntos de la señal, con objeto de producir una representación estática de ésta.

Otra posibilidad que ofrecen la mayoría de los osciloscopios modernos es la de poder representar simultáneamente dos diferentes señales en la pantalla que se aplican sobre entradas diferentes. Para ello el osciloscopio dispone de dos canales amplificadores internos independientes que entregan las señales a un tubo de rayos catódicos de doble haz o a un sistema que las conmuta sobre un haz único y permite representar las dos formas de onda al mismo tiempo.

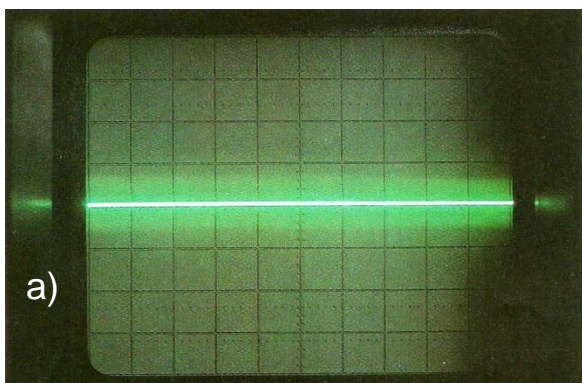


Distintos sistemas de funcionamiento de un osciloscopio de doble canal: a) Mediante tubo de doble haz catódico. b) Mediante la conmutación de los dos canales a la frecuencia necesaria para que no se detecte a simple vista.

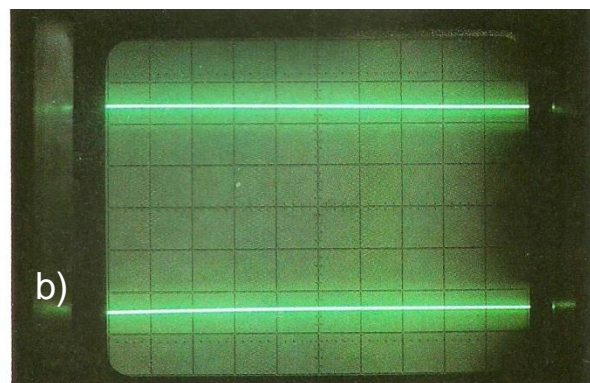


Entradas correspondientes a los dos canales A y B. Se observa también el teclado selector del canal, canales o combinaciones entre los mismos que se desean presentar en la pantalla. La tensión a medir en cada canal AC o DC. La sincronización de disparo (trigger) A y B.

En las siguientes figuras se observa las imágenes de un osciloscopio de un solo canal y otro de dos canales. En este último son dos canales independientes de señales que hacen llegar al tubo de rayos catódicos dos imágenes diferentes produciéndose una presentación simultánea de las mismas sobre la pantalla.



a) Trazo horizontal en la pantalla correspondiente a un solo canal sin aplicar señal a la entrada.

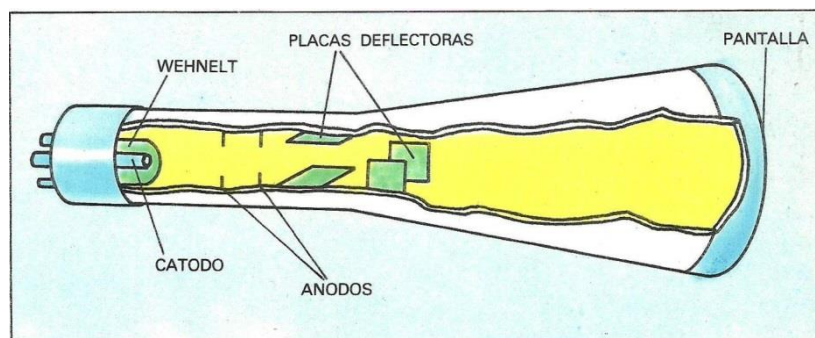


b) Las dos trazas horizontales que se observan corresponde a los dos canales del osciloscopio de doble traza en ausencia de señales de entrada.

La mayoría de los modelos de osciloscopios ofrecen la posibilidad de medir tensiones continuas obteniéndose un trazo horizontal en la pantalla cuya altura respecto al nivel de referencia fijado previamente dará el valor de la tensión continua.

Generación y movimiento del haz catódico

El elemento interno más importante del osciloscopio es el tubo de rayos catódicos está constituido por una ampolla de vidrio, en el que se ha practicado el vacío y en la que están contenidos varios electrodos en lugares situados a lo largo del cuello de la misma. Todos ellos son accesibles a través de los contactos situados en la base o zócalo de la ampolla y en algún punto del cuello. La cara del tubo, que constituye la pantalla es plana y está recubierta internamente de fósforo que se iluminan al recibir la incidencia del rayo electrónico. La cantidad de luz que emiten depende de la velocidad de choque del rayo con la pantalla. Los electrones del haz o rayo catódico se generan en un filamento o cátodo por efecto termoiónico. A partir de este cátodo existen tres electrodos destinados a funciones de control del haz.



Tubo de rayos catódicos del tipo de deflexión electrostática, empleado en osciloscopio.

Los siguientes elementos de control externo nos facilita el manejo de diferentes funciones para conseguir sacar el máximo partido al osciloscopio y obtener los mejores resultados de visualización de la señal de onda a medir.

Control BEAM INTENSITY/BRIGHTN

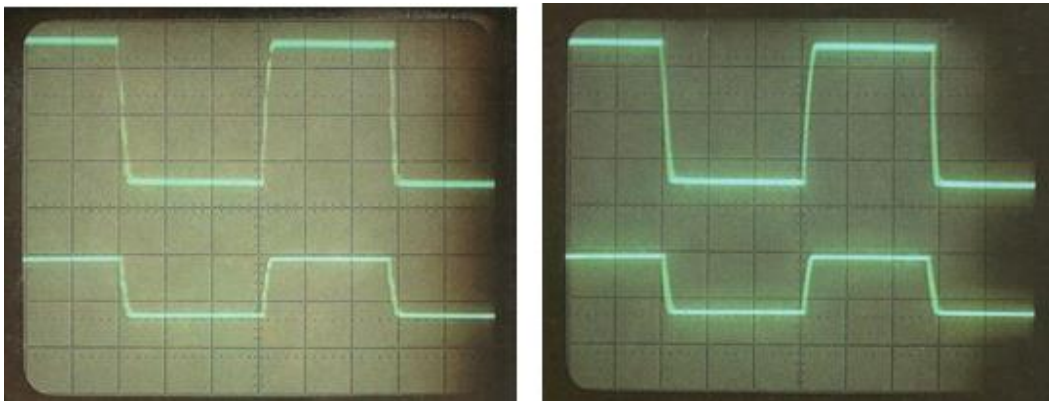
La luminosidad o brillo de la pantalla de un osciloscopio se regula mediante la tensión aplicada al electrodo más cercano al cátodo o **Wehnelt**, que al ser negativa ejerce una gran influencia sobre la intensidad del haz. Esta tensión se puede variar a través de un potenciómetro externo.

El primero de los electrodos que encuentra el haz en su trayectoria hacia la pantalla es el Wehnelt que tiene una tensión negativa con respecto al cátodo. Regulando esta tensión por medio de un potenciómetro se puede dejar pasar un número mayor o menor de electrones aumentando o disminuyendo, en consecuencia, la **luminosidad**. Este

potenciómetro es accesible desde el exterior del aparato, identificado con la leyenda **BRILLO, INTENSIDAD, BRIGHTNESS** o **BEAM INTENSITY**.



Detalle del control de luminosidad BEAM INTENSITY/BRIGHTN.



Dos aspectos de la misma onda en la pantalla de un osciloscopio de doble traza, con diferentes niveles de brillo.

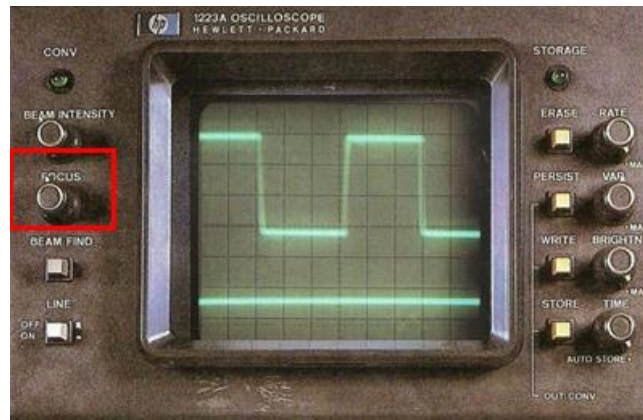
Hay que tener en cuenta que un brillo excesivo puede llegar a dañar los fósforos de la pantalla produciendo unas marcas imposibles de eliminar, por tanto, siempre se trabajará un brillo moderado, que sea suficiente para observar todos los detalles de las ondas medidas.

Control FOCUS

El siguiente control realiza una función aceleradora y de enfoque. Para ello reciben una tensión relativamente alta, de varios cientos de voltios, con lo que imprimen al haz catódico una velocidad bastante elevada.

La función de enfoque se consigue mediante la diferencia de potencial existente entre estos dos ánodos, de forma que el primero es algo más negativo que el segundo.

Variando la tensión entre ambos se puede conseguir enfocar el rayo electrónico sobre un punto muy fino de la pantalla, lo que se realiza a través de un potenciómetro que es también accesible externamente con la leyenda **FOCO** o **FOCUS**.



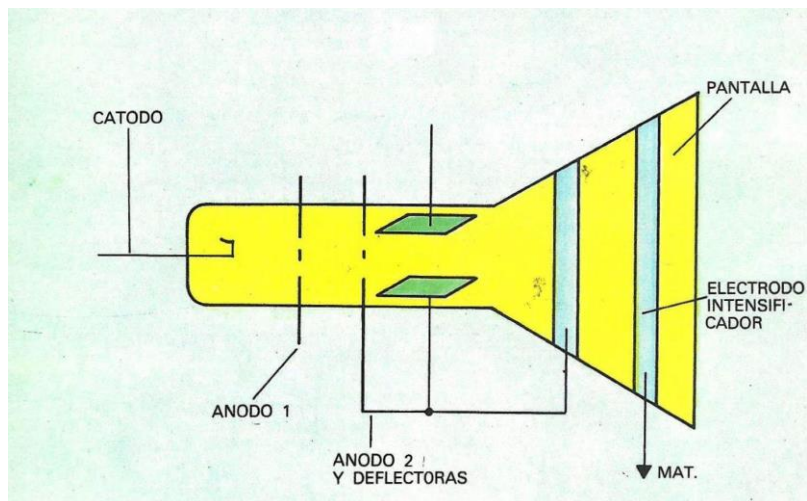
Potenciómetro de control para el ajuste del foco de la onda. Ejemplo de imagen desenfocada.

Controles de POSICIÓN (Vertical y Horizontal)

Después de los electrodos anteriores se encuentran las placas de desviación o deflexión. Su función es la de producir sobre el haz electrónico un efecto de atracción o repulsión para que modifique su trayectoria y pueda incidir en cualquier punto de la pantalla. La tensión media existente en las placas desviadoras tanto sobre las horizontales como en las verticales es casi igual a la aplicada en el último ánodo, de manera que no se altere la velocidad de los electrones y que en ausencia de tensiones desviadoras, el haz catódico incida en el centro geométrico de la pantalla. Si sobre esta tensión continua de polarización se aplica una segunda tensión entre ambas placas horizontales, se observará una desviación horizontal del punto luminoso que se encontraba en el centro, hacia uno de los bordes verticales de la pantalla.

Se observa que cuando la tensión aceleradora, aplicada al último ánodo se eleva, se obtiene un resultado negativo para la sensibilidad, ya que tenderá a disminuir, sin embargo, si este voltaje se hace muy bajo, la luminosidad resultante sobre la pantalla se reduciría tanto que podría dejar de ser visible.

Es necesario, por tanto, un dispositivo adicional que evite esta incompatibilidad. Este elemento consiste en un **electrodo postacelerador** o **intensificador** que es un último ánodo acelerador situado detrás de las placas desviadoras y a corta distancia de la pantalla, al que se aplica una elevada tensión que garantiza la luminosidad de deflexión y así evita la incompatibilidad que existiría entre el brillo de ésta y la sensibilidad de deflexión.



Tubo de rayos catódicos dotados de electrodo intensificador

Este electrodo está constituido, generalmente, por una capa conductora en espiral aplicada en el interior de la ampolla de vidrio, con una conexión directa al exterior, con objeto de evitar el riesgo de disponer de una tensión elevada en el zócalo de conexiones del tubo. La tensión continua aplicada entre las placas desviadoras es regulada desde el exterior mediante unos potenciómetros que regulan la situación del haz sobre la pantalla con las leyendas **POSICIÓN HORIZONTAL** o **HORIZONTAL POSITION** o \leftrightarrow y **POSICIÓN VERTICAL** o **VERTICAL POSITION** o \updownarrow



Potenciómetros que regulan la situación del haz sobre la pantalla en su posición vertical y horizontal.

El factor que depende de la mayor o menor desviación del haz sobre la pantalla es la longitud y separación de las placas deflectoras, así como de la distancia entre el centro de las mismas y la pantalla. También depende de la tensión de aceleración y lógicamente de la deflexión.

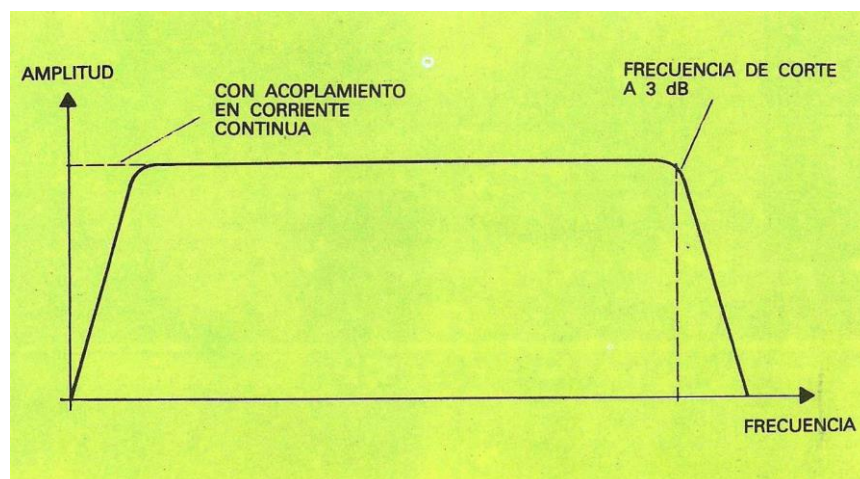
Amplificadores internos

Como ya se ha comentado anteriormente, la desviación del haz de electrones requiere de la aplicación de tensiones importantes sobre las placas desviadoras, tanto horizontales como verticales. Estas tensiones deben de ser generadas por el propio instrumento a través de unos amplificadores internos que aumenten al nivel de las señales que se deseen observar, aplicadas sobre sus entradas. Es necesario, por lo tanto, contar con un mínimo de tres amplificadores para realizar las siguientes funciones:

- ❖ Amplificador vertical (Y).
- ❖ Amplificador horizontal (X).
- ❖ Base de tiempos.

Características

Tanto el amplificador vertical como el horizontal deben de responder a una exigencias muy estrictas con objeto de realizar una reproducción lo más fiel posible de la señal aplicada, ya que cualquier error o distorsión que produzca se va a traducir en una representación deficiente de la señal sobre la pantalla, lo que puede ser interpretado como un defecto del punto del circuito que se está analizando y originando confusiones. Por lo tanto la ganancia debe ser uniforme en todo el margen de frecuencia en que trabaje el osciloscopio, presentando una curva característica **amplitud-frecuencia lineal**.

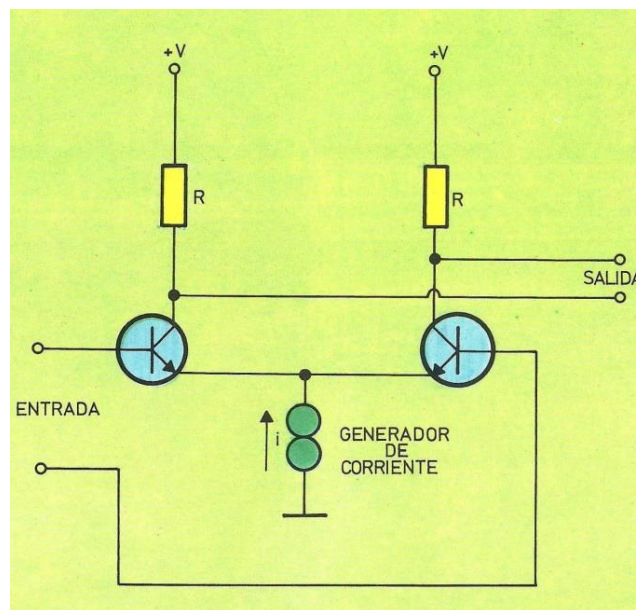


Curva de respuesta amplitud-frecuencia plana, similar a la que debe de ofrecer un osciloscopio.

Es también necesario que el tiempo de retardo que produce el amplificador sobre la señal que se le aplique sea constante e invariable para cualquier frecuencia ya que de lo contrario se producirían distorsiones en todas aquellas señales que contengan una cierta cantidad de armónicos o frecuencias diferentes, debido a que algunas aparecerían retrasadas con respecto a las otras, cambiando sustancialmente su forma de onda.

Otra característica importante a destacar es la posibilidad de medir tensiones continuas con el instrumento, de que se dispone en la mayoría de los modernos osciloscopios. Ello indica la necesidad de que los amplificadores y sobre todo el vertical esté diseñado sin emplear condensadores de acoplo entre las diversas etapas, lo que redundaría en la posibilidad de medir tensiones en frecuencias bajas o muy bajas sin error apreciable.

Estos amplificadores están realizados a base de etapas **diferenciales** o simétricas ya que son las que mejor pueden satisfacer las exigencias anteriores.



Esquema eléctrico de una etapa en montaje de amplificador diferencial.

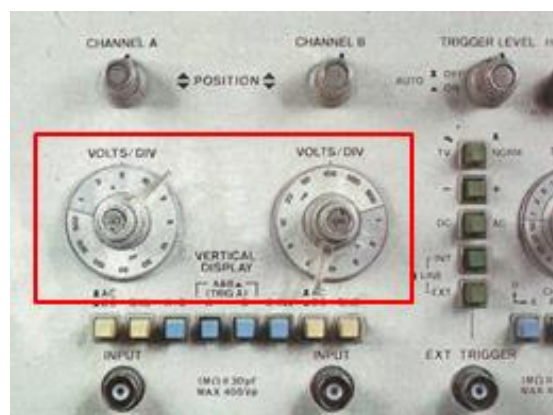
Atenuadores

Otra importante característica a tener en cuenta es que las señales que se van a visualizar son de diferente procedencia y de muy variada **amplitud** por lo tanto se necesita algún sistema que sea capaz de regular la ganancia para que la amplificación de las señales más fuertes sea mucho menor que la de las débiles, con objeto de que ambas produzcan una representación idéntica sobre la pantalla. Además es necesaria una perfecta **calibración** de esta ganancia para que puedan realizarse medidas de niveles y amplitudes que resulten fiables. Por último, se debe de tener la posibilidad de

representar la señal con el tamaño o altura que más convenga para la observación, lo que exige un procedimiento de ajuste de ganancia en varios escalones, seleccionables desde el exterior.

La forma de realizar todas estas funciones es utilizando un circuito **atenuador** con varios pasos seleccionables que permitan elegir el más apropiado para la observación. Está situado antes del amplificador y acoplado a la entrada del instrumento. El efecto del conjunto **atenuador-amplificador** produce la ganancia variable deseada.

Las exigencias impuestas a los **atenuadores** son similares a las de los amplificadores en cuanto a la completa fidelidad de transmisión de la señal.

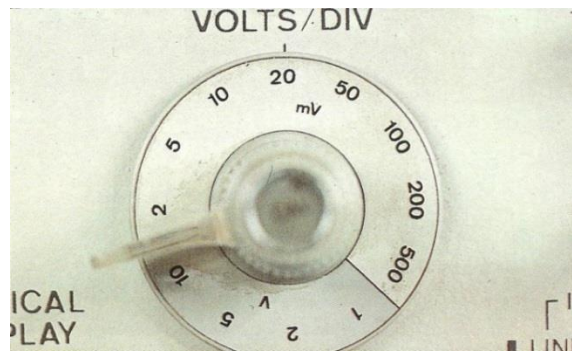


Detalle de los dos controles VOLTS/DIV de ganancia del amplificador vertical de los canales.

Los **atenuadores** deben también satisfacer una última exigencia que es la de proporcionar una elevada impedancia ya que ésta será la de la entrada del osciloscopio. Suelen emplearse para esta función las etapas a transistores denominados de seguidor de emisor por sus propiedades de alta impedancia de entrada y baja de salida. Además puede estar dividida la resistencia de emisor en varias partes seleccionables con el conmutador o **selector de amplitud** obteniéndose así los escalones de ganancia necesarios.

Ancho de banda

El **ancho de banda** que es capaz de reproducir un osciloscopio está definido por todo el margen de frecuencias que puede aplicarse a éste y ser presentado en la pantalla sin que su amplitud se vea afectada; en realidad este margen se extiende hasta aquella frecuencia denominada “de corte” en la que existe una atenuación de 3 dB.



Detalle de uno de los controles de amplitud de ganancia del amplificador vertical. Este dispone de saltos desde 2mV/división hasta 10V/división.

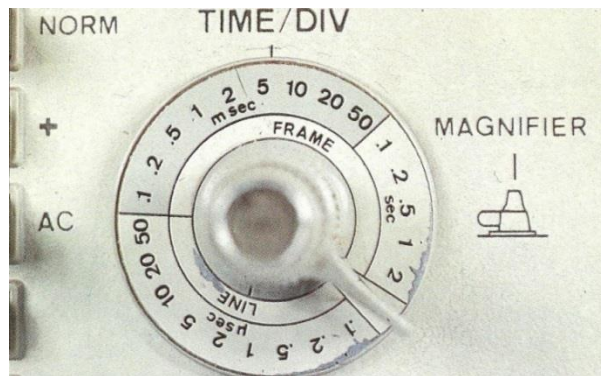
Para poder medir y visualizar correctamente la amplitud de una señal, hay que seleccionar en el selector VOLTIOS/DIVISION el valor de la tensión de la señal, ejemplo, si la tensión de la señal a medir es de 5 voltios, pondremos el selector en la posición de 2V/división, cada división corresponde a una cuadrícula de la pantalla del osciloscopio y se suman las cuadrículas verticalmente que ocupa la señal, mostrándose 2 cuadrículas y media, cuyo valor corresponde a 5 voltios.

Para obtener una buena exactitud en la medida es haciendo que los diferentes saltos o escalones de medida que ajustan la ganancia del conjunto atenuador-amplificador estén perfectamente calibrados.

En síntesis generales los circuitos atenuadores situados en la entrada de un osciloscopio realizan dos funciones importantes que consisten en presentar la alta impedancia de entrada que se requiere y la de dotar al instrumento de todos los saltos de ganancia necesarios para poder representar señales débiles o con nivel elevado.

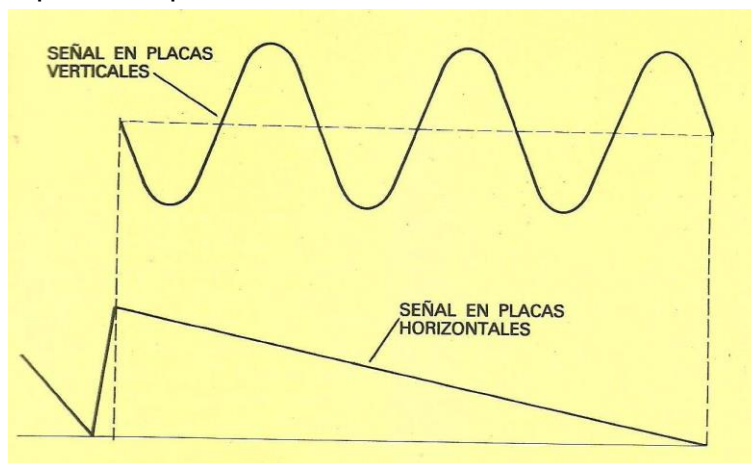
Base de tiempos

Ya se comentó anteriormente que para poder representar en la pantalla la señal aplicada en la entrada vertical existen dos alternativas que consisten en aplicar una tensión a las placas horizontales que provenga de una entrada externa (X) a través de un sistema **atenuador-amplificador** similar al de vertical (Y) o bien utilizar el circuito interno del osciloscopio denominado **base de tiempos** ya preparado para obtener los niveles de tensión necesarios para la deflexión.



Detalle del control de la duración del diente de sierra, dispone de saltos desde 2 seg/división hasta 0,1 μ seg/división.

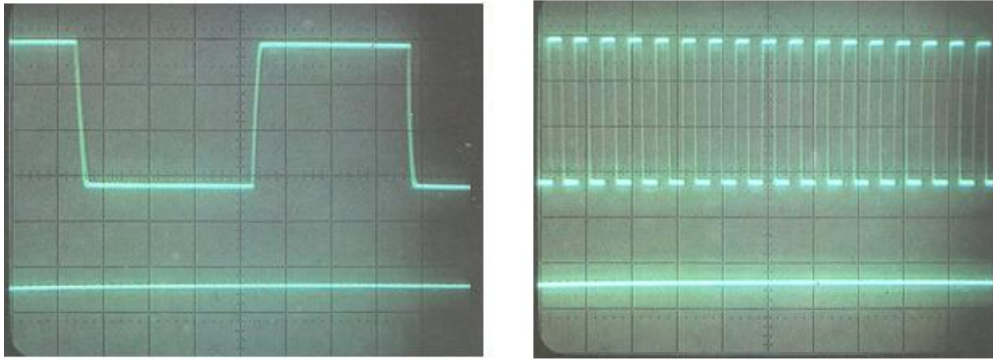
Este último circuito produce una forma de onda muy peculiar denominada “diente de sierra”. Esta señal está formada por dos trazos de variación de tensión, uno rápido y otro lento y con sentidos de variación opuestos. Cuando comienza el tramo de variación lenta el haz de electrones se sitúa hacia uno de los extremos. Conforme va variando la tensión de desviación, el haz se va desplazando paulatinamente hacia el otro extremo. Cuando acaba este tramo, comienza el de variación rápida y sentido opuesto, con lo que el haz se desplazará rápidamente hacia el extremo inicial, para comenzar de nuevo el ciclo. Este tramo es el tramo de **retorno** del haz y si es lo suficientemente rápido no será visible cuando vuelva a su punto de partida.



Mediante el diente de sierra, obtenido en la base de tiempos, se pueden observar tres ciclos completos de

En síntesis generales la señal generada por el circuito de base de tiempos es una señal en diente de sierra formada por dos tramos, el más lento produce el desplazamiento horizontal del haz durante el intervalo visible y el rápido hace retroceder el haz a su punto de partida.

El circuito de **base de tiempos** produce una gama de frecuencias muy amplia para obtener dientes de sierra de distinta duración y así poder representar toda la banda de frecuencias que admite el osciloscopio. Cada uno de los tiempos de barrido es seleccionable y está calibrado en unidades de tiempo.

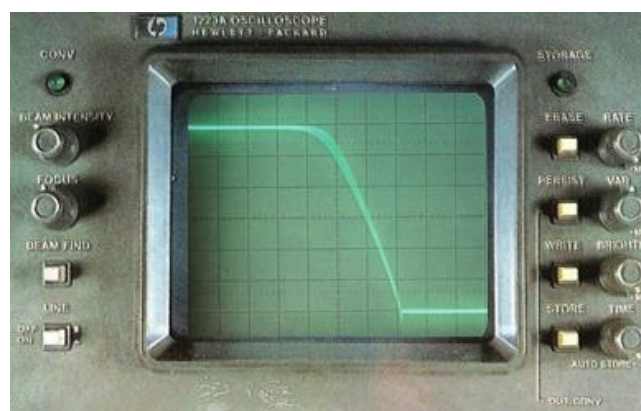


Las imágenes muestran dos aspectos de una misma señal analizada con diferentes tiempos de barrido, seleccionada en el conmutador selector de la base de tiempos **TIME/DIV.**

Con esta forma de onda en el canal **horizontal (X)** se conseguirá expandir las subidas y bajadas del haz que produce cualquier señal de entrada.

Por lo tanto las características más destacadas que deben reunir los amplificadores de señal **X** e **Y** son fundamentalmente dos; respuesta lineal con la frecuencia y tiempo de retardo constante.

Puesto que es necesario que el osciloscopio trabaje con señales de distintas frecuencias será preciso disponer de dientes de sierra de distinta duración. Esto se consigue haciendo que los generadores internos varíen su frecuencia en una forma controlada, por un mando conmutador accesible exteriormente, a base de saltos o escalones perfectamente calibrados en unidades de tiempos por cada división de la cuadrícula de la pantalla (normalmente en centímetros). De esta forma un osciloscopio puede producir, en su circuito de base de tiempos, frecuencias de barrido muy bajas, del orden de varios segundos por división, hasta frecuencias muy altas de $0,1 \mu\text{seg}$ o incluso menos por división.



Reduciendo mucho el barrido pueden llegar a observarse con detalle los flancos de subida o bajada de la señal.

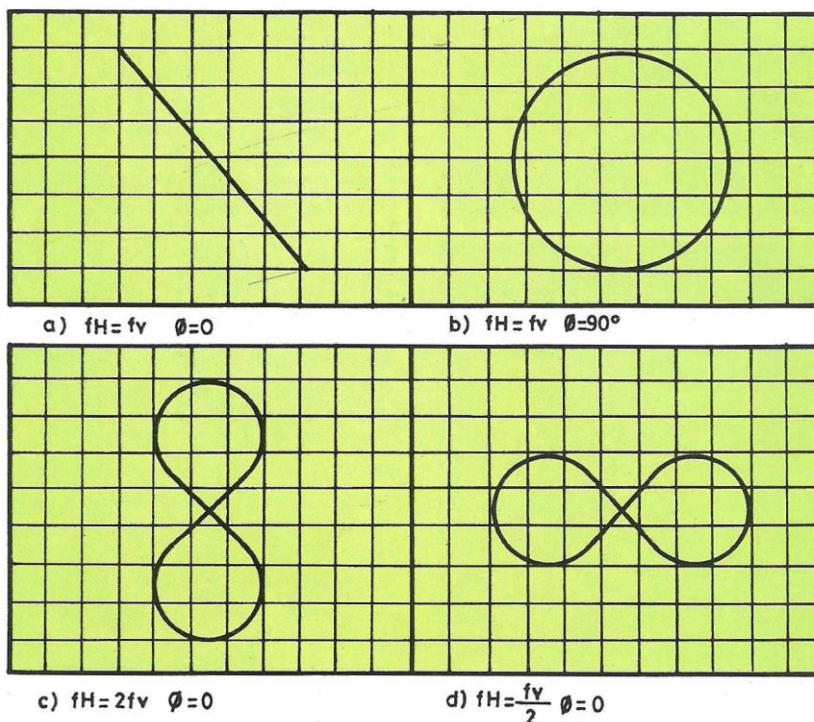
La base de tiempos que debe elegirse depende lógicamente de la señal que se desee observar, por ejemplo, si se quiere ver una forma de onda de una frecuencia del orden de 1 KHz, su período será de 1 mseg, lo que supone una base de tiempos de 0,5 mseg/cm. (1 ciclo de señal ocupará 2 centímetros) o 1 mseg/cm. (1 ciclo de señal ocupará 1 centímetro).

Las figuras de Lissajous

Si en lugar de utilizar la base de tiempos se aplica a la entrada X una señal externa, la conjunción de ésta con la del canal Y producen sobre la pantalla, en el caso de que ambas sean sinusoidales, unas curvas muy características denominadas genéricamente figuras de **Lissajous**.

Pueden obtenerse infinitas combinaciones de parejas **amplitud-frecuencia** de cada una de las dos señales alternas, que producirán infinitas formas sobre la pantalla del osciloscopio. Las aplicaciones más usuales de estas curvas son las siguientes:

- ❖ Comparación de frecuencias.
- ❖ Medida de deformaciones o distorsiones.
- ❖ Medida del desfasaje.
- ❖ Medida de frecuencias.

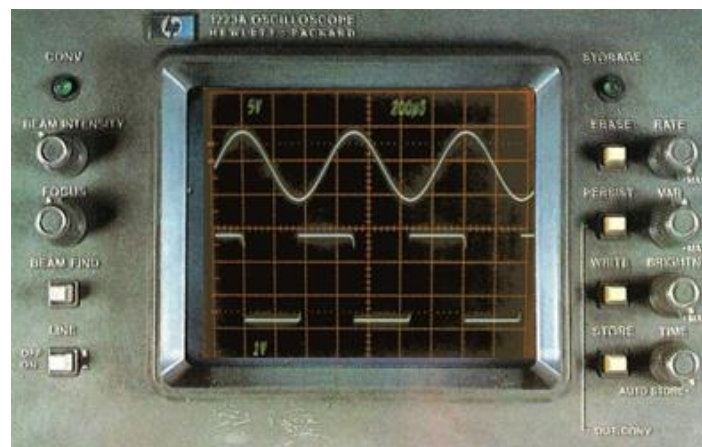


Diferentes ejemplos de figuras de Lissajous: a) Dos señales iguales en frecuencia y base. b) Dos señales de la misma frecuencia pero desfasadas 90° . c) y d) Figuras producidas por señales de frecuencia doble y mitad, respectivamente.

Osciloscopios de dos canales

Los osciloscopios de doble canal o doble traza son los más solicitados hoy en día por sus grandes ventajas y numerosas aplicaciones, dichos equipos contienen dos amplificadores verticales (Y), generalmente idénticos, que permiten procesar y presentar dos señales completamente independientes.

Por lo tanto, la gran ventaja que aportan estos osciloscopios es que con ellos se pueden observar **simultáneamente** las dos señales aplicadas a sus entradas, de diferentes puntos de medidas, de ahí se deduce su denominación.



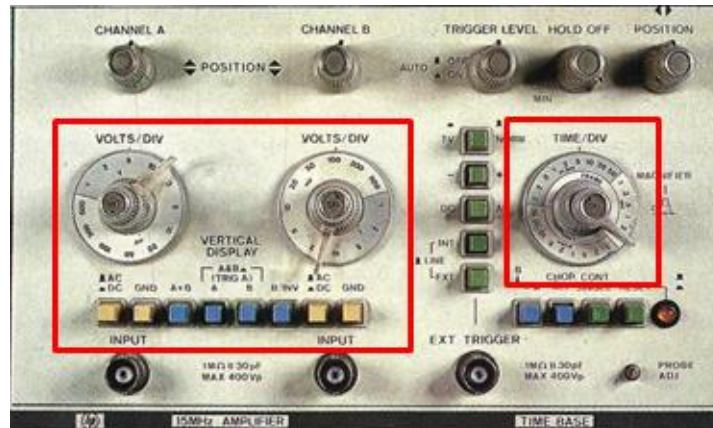
Detalle de un osciloscopio de doble canal. Obsérvese que los canales son totalmente independientes puesto que las ondas son perfectamente diferentes.

Para construir un osciloscopio de estas características, los fabricantes han recurrido a dos sistemas diferentes de deflexión:

1. Empleo de un tubo de rayos catódicos con doble cañón de electrones y doble juego de placas verticales de deflexión.
2. Empleo de un tubo de rayos catódicos convencional, dotado al instrumento de un sistema de conmutación que presente las dos señales alternativamente.

En ambos sistemas las señales de entrada que se desean visualizar se mantienen completamente separadas a lo largo de todo su recorrido por los circuitos del osciloscopio hasta alcanzar el tubo en el que tampoco existe ninguna interacción mutua entre ellas. El primero de los dos sistemas expuestos es bastante simple ya que las dos señales aplicadas a las entradas verticales alcanzan el doble juego de placas verticales produciendo cada una su propia deflexión sobre el haz catódico que le corresponda. El circuito de la base de tiempos es común para ambos, por lo tanto la deflexión horizontal

debe de elegirse de forma que el período de barrido de la pantalla permita visualizar las dos señales.



Panel de control del osciloscopio en el que se observan los tres mandos de ganancia de los canales y frecuencias de barrido. La botonera de la izquierda selecciona la forma de presentación de los canales.

Conmutación electrónica

Si sobre las placas del canal vertical se aplica una tensión continua, el haz se desviará una longitud fija respecto del eje horizontal. Si la polaridad de dicha tensión se invierte, el haz aparecerá igualmente desplazado del eje horizontal, pero del lado opuesto.

Si ahora se superpone dichas tensiones continuas las señales a visualizar, aparecerán como si el eje horizontal estuviera desplazado y situado sobre las líneas correspondientes a dichos valores continuos.

En la práctica no se visualizarán en cada barrido ambas señales, superpuestas sobre el valor continuo, sino que se emplean un sistema de conmutación mediante dos procedimientos diferentes que pueden elegirse a voluntad a través de los mandos externos del aparato. Son los siguientes:

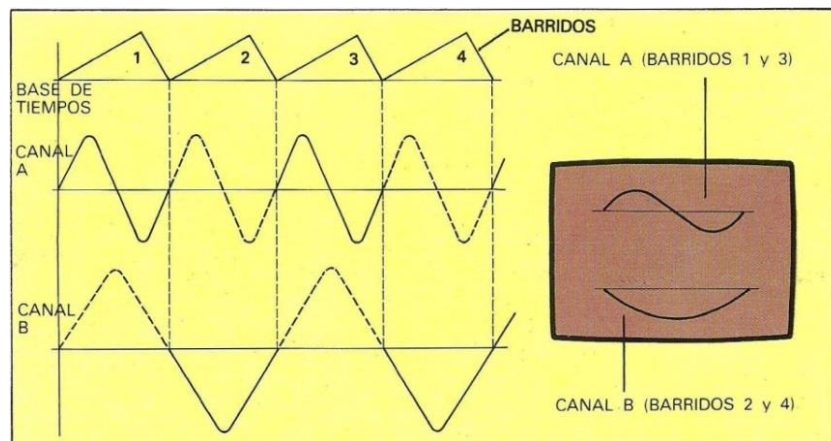
- Modo alternado.
- Modo muestreado o “choppeado”.

Cuando el osciloscopio trabaja en el **modo alternado** uno de los canales se presenta sobre la pantalla con los “dientes de sierra” que hacen números pares de la señal de deflexión horizontal, producida por la base de tiempos, mientras que el otro canal se presenta con los impares. En cada canal se superpone una tensión continua diferente para que aparezcan en distintos lugares de la pantalla pudiéndose regular la posición de cada uno de forma independiente con dos mandos externos.

Las limitaciones que tiene el **modo alternado** es que no puede ser empleado para representar formas de onda con frecuencias bajas, ya que ello requiere velocidades lentas de barrido, con lo que se percibe claramente el alternamiento de los canales.

Cuando se emplea este sistema y la velocidad escogida para el barrido es alta, el ojo no percibirá las sucesivas alternancias y la impresión resultante será la de la visualización simultánea de los dos canales. En cambio con velocidades de barrido bajas el ojo percibirá claramente la no simultaneidad de la presentación visual.

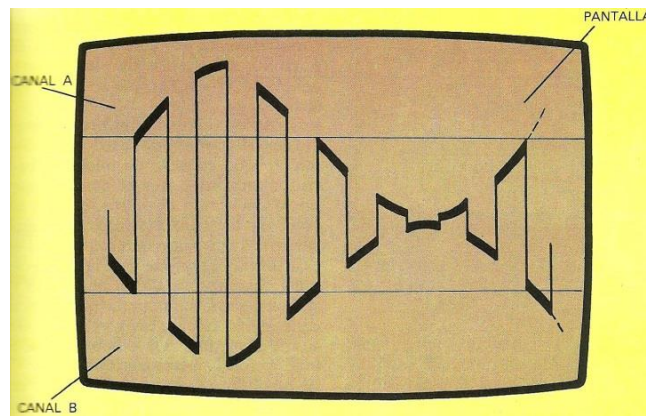
Este método no permite hacer mediciones de fase relativa entre ambas señales, ya que cada una de ellas, en el barrido que le corresponda, disparará el barrido con la amplitud de señal que se haya fijado previamente, sin que pueda asegurarse que exista una relación temporal entre ambos fenómenos.



Sistema de barrido de un osciloscopio en el modo alternado. Únicamente se observarán en la pantalla los periodos de señal indicados con trazo continuo.

Cuando se trabaja con el **modo muestreado** o “choppeado” el sistema de deflexión vertical va pasando muy rápidamente de un canal a otro durante el tiempo que dura el diente de sierra aplicado a las placas horizontales, de forma que el periodo en que se presenta la señal de cada uno es siempre el mismo.

Las limitaciones que presenta en el **modo muestreado** se producen en las frecuencias altas, ya que se observará cómo las señales están representadas mediante varios trazos, consecuencia del muestreo.

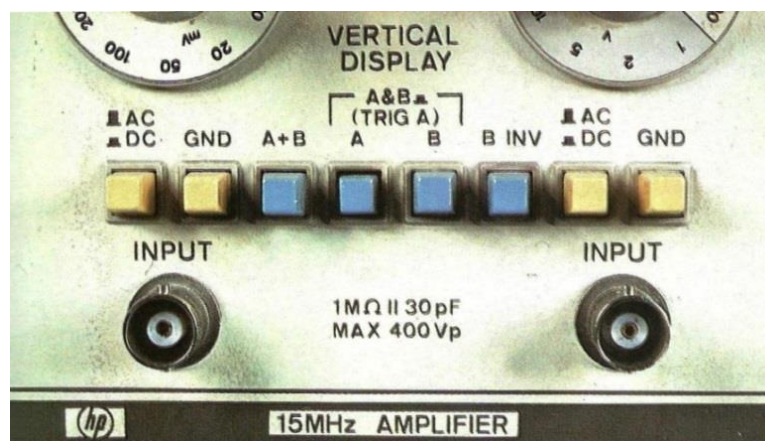


Modo muestreado o "choppeado". La presentación de las señales en pantalla es discontinua.

Este sistema, al contrario de lo que ocurría con el otro modo de funcionamiento, será eficaz cuando se escogen velocidades de barrido bajas ya que el ojo no percibirá los saltos del haz, pareciéndole que observa los dos canales al mismo tiempo. En cambio, cuando la velocidad de barrido es alta, y puesto que el tiempo de muestreo es siempre el mismo, puede apreciarse cómo las formas de onda de ambos canales están representadas a "trazos" ya que esto es lo que hace el osciloscopio en la realidad.

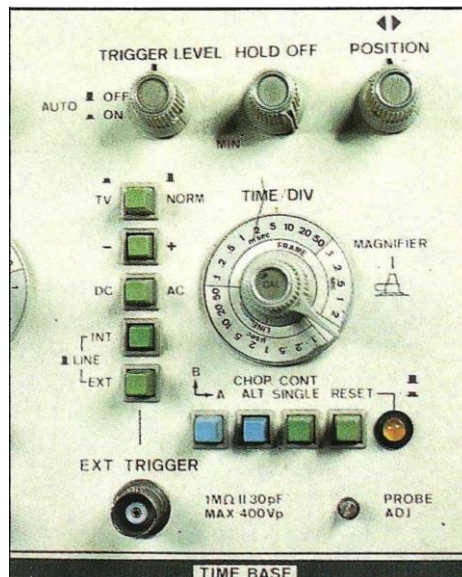
Combinaciones entre los canales

En los osciloscopios de doble canal existen varias posibilidades a la hora de elegir la imagen que se desea observar sobre la pantalla. Lógicamente podrá seleccionarse un solo canal para ser observado, de entre los dos canales A o B de que se dispone como si se tratara de un osciloscopio de una sola traza. También podrán seleccionarse los dos canales A y B simultáneamente, o bien realizar alguna combinación lineal entre ambos presentando la señal suma (A+B) o la diferencia (A-B) o (B-A).

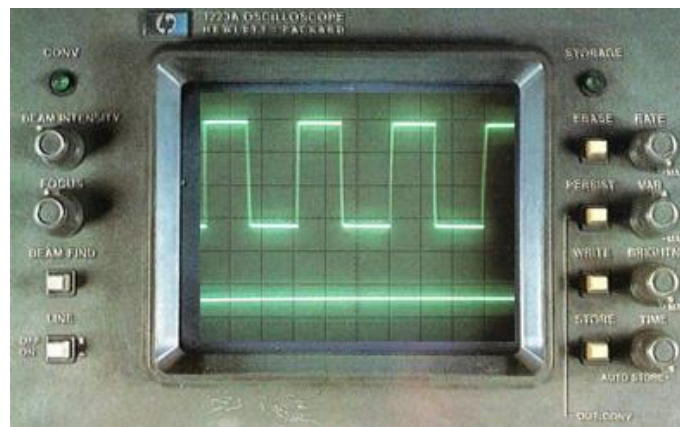


Diferentes combinaciones de los canales A y B mediante botoneras de selección.

Como en caso del osciloscopio de dos canales, el circuito de la **base de tiempos** es común para los dos canales lo que obliga a elegir cuidadosamente el tiempo de barrido, en la misma forma que se mencionó anteriormente.



El control de la base de tiempos TIME/DIV es común para los dos canales.

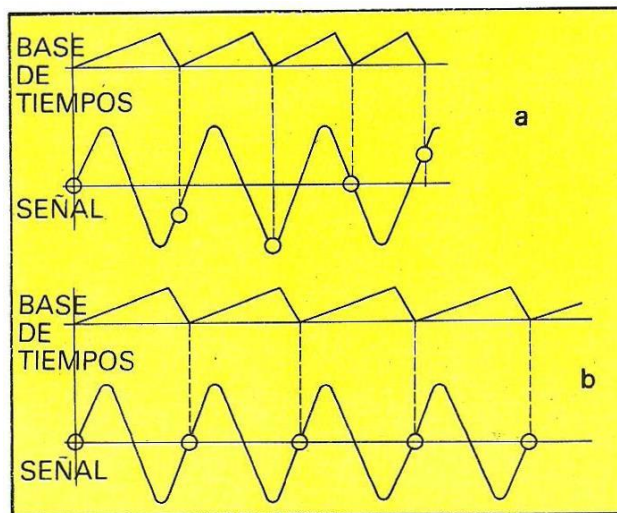


Señal aplicada a uno de los canales. Puede verse la traza horizontal del barrido del otro canal en ausencia de señal.

Sincronización

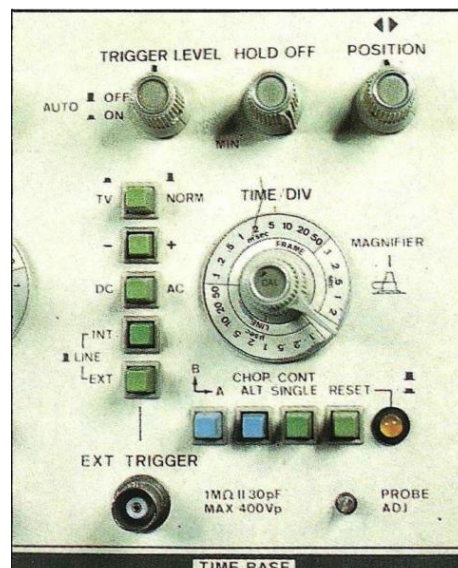
Con el sistema de deflexión horizontal mediante una señal de diente de sierra puede darse el caso de que cuando el haz vuelva al punto de origen para comenzar un nuevo barrido, la forma de onda de la señal que se pretende visualizar, no se encuentre en el mismo punto que se encontraba al comienzo del barrido anterior. Esto se manifiesta en la pantalla como un movimiento continuo de la forma de onda, dando la impresión de que se desplaza hacia la derecha o hacia la izquierda a una velocidad que depende de la frecuencia de la señal y de la duración del diente de sierra.

Existen dos formas de corregir este efecto. En los osciloscopios más sencillos y con menores prestaciones se recurre a variar el periodo del diente de sierra hasta que coincida con un múltiplo del periodo de la forma de onda representada. Si esta variación es continua, mediante un potenciómetro se puede llegar a “parar” la onda sobre la pantalla. Este procedimiento es muy imperfecto pues sólo resulta satisfactorio cuando la frecuencia de la señal mostrada es constante. En caso contrario, habría que estar regulando continuamente el mando que fija el periodo del diente de sierra para adaptarse a la señal que se desea visualizar.



Sincronización de la base de tiempos. a) El diente de sierra no está sincronizado ya que no coincide sobre los mismos puntos de la forma de onda. b) Diente de sierra sincronizado.

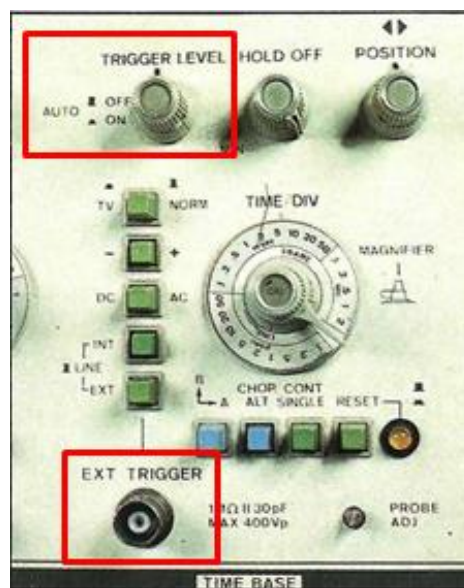
Los osciloscopios de mayores prestaciones disponen de otro procedimiento que consiste en iniciar el barrido horizontal con el consiguiente inicio del diente de sierra, cuando el nivel de la señal a visualizar se encuentre a un valor determinado. De esta forma siempre se verá la forma de onda comenzando en un punto fijo y se conseguirá mantenerla parada sea cual sea su frecuencia y el diente de sierra empleado. Así se habrá logrado una perfecta **sincronización**.



Control de frecuencia de barrido y botones de selección del modo de funcionamiento y de la señal de disparo.

Nivel de disparo

El nivel de señal elegido para que se “dispare” el barrido puede ser fijado con el correspondiente mando externo con la indicación **NIVEL DE DISPARO** o **TRIGGER LEVEL**. También puede optarse por que sea el propio osciloscopio el que elija el nivel más adecuado para el “disparo” mediante el sistema de **sincronización automática**. Existe otra posible forma de “disparar” el osciloscopio que consiste en emplear una señal externa destinada exclusivamente para esta finalidad. Casi todos los osciloscopios disponen de esta posibilidad para lo que contienen un conector sobre el que se puede aplicar la señal externa con la indicación **DISPARO EXTERNO** o **EXTERNAL TRIGGER**.



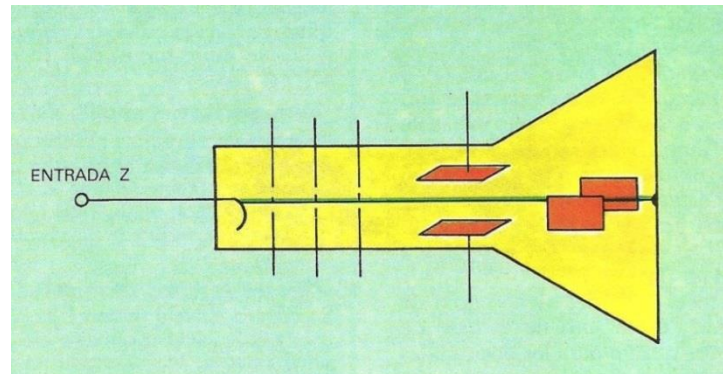
Detalle del mando externo del nivel de disparo TRIGGER LEVEL y el conector de entrada de señal exterior para el disparo externo EXT TRIGGER.

Este sistema de “disparo” se utiliza cuando se desean observar formas de onda de impulsos no periódicos o que se presentan muy aleatoriamente en el tiempo. La forma de trabajo es similar a la sincronización automática. Por ello, el circuito de disparo sirve para conseguir que el circuito de base de tiempos arranque cuando la señal a representar alcance un cierto nivel, obteniéndose así una perfecta sincronización.

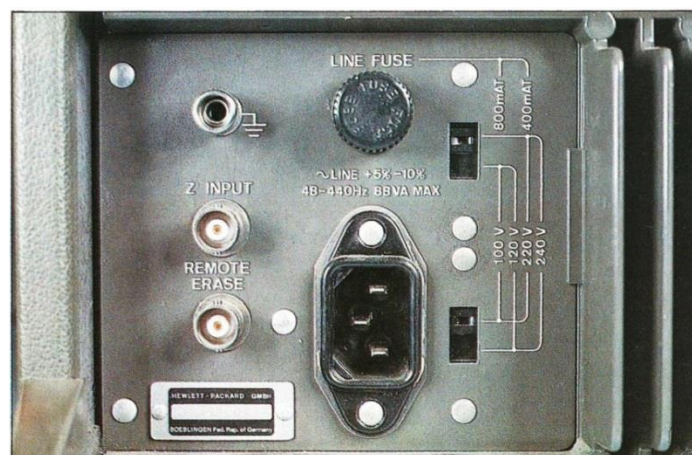
Por último existe también la posibilidad de “disparar” el osciloscopio manualmente a través de un pulsador, el cual producirá un solo barrido sobre la pantalla, lo que resulta útil cuando se desea realizar fotografías de una forma de onda determinada.

Modulación en intensidad

Aparte de la representación clásica de una forma de onda sobre la pantalla, casi todos los osciloscopios disponen de la posibilidad de modular la intensidad del haz catódico aplicando una señal exterior sobre una entrada situada en la zona posterior, con la indicación **Z**. Este tercer canal conocido como **canal Z** produce unas zonas más oscuras y más brillantes en la pantalla dependiendo de la forma de onda aplicada. Su empleo es muy limitado contando con pocas aplicaciones.



Conexión de la entrada Z sobre el tubo de un osciloscopio



Zona posterior del osciloscopio en la que se observa el conector preparado para la entrada Z.

Por lo tanto, la **entrada Z** se emplea cuando se desea modular la intensidad del haz catódico con una señal exterior, lo que producirá una serie de trazos claros y oscuros cuya posición y características dependen de ella.

Osciloscopio de memoria

Los **osciloscopios de memoria** ofrecen una serie de posibilidades mayores que los convencionales para el análisis y medida de las características de una señal eléctrica determinada.

Gracias a ellos se puede hacer posible la observación de señales que requieren bajas velocidades de barrido, generalmente inferiores a 2ms/div, ya que en el osciloscopio convencional se produciría una oscilación o "salto" de la imagen tan fuerte que perturbaría completamente la medida de la forma de onda. Otra aplicación importante es la visualización de señales cuya frecuencia de aparición es baja y sin embargo, es preciso aplicar velocidades de barrido elevadas, ya que el brillo de la pantalla se reduciría notablemente, haciendo casi imposible la observación. Por último, con el osciloscopio de memoria se puede conseguir la visualización de señales no repetitivas que aparecen ocasionalmente y que es necesario observar y medir.

El principio de funcionamiento del osciloscopio de memoria o de persistencia está basado casi exclusivamente en el empleo de un tubo de rayos catódicos especial, denominado **persistencia variable**

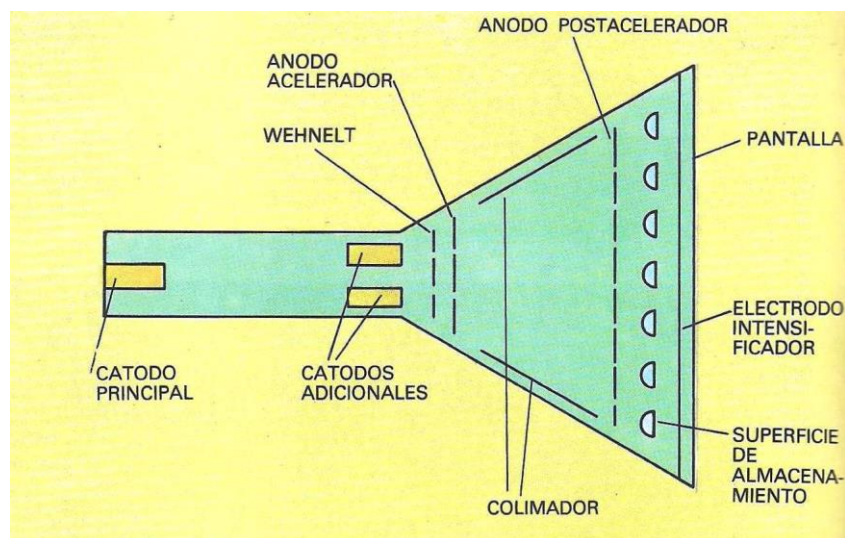
Tubos de persistencia variable

El sistema de almacenamiento de señal o de persistencia se realiza en el tubo a base de dotarle de un elemento interno en el que quede "grabada" la imagen que se desea observar. El tubo cuenta también con dos cátodos, generadores de haces de electrones adicionales, destinados a los dos canales de entrada, cuya misión es la de proyectar sobre la pantalla las imágenes almacenadas por el electrodo anterior.

Elementos adicionales

Para conseguir el efecto completo será preciso que el tubo disponga entonces de los siguientes elementos adicionales:

- Dos cátodos generadores de rayos electrónicos.
- Rejilla Wehnelt.
- Ánodo acelerador.
- Colimador.
- Electrodo postacelerador de almacenamiento.
- Electrodo de almacenamiento.



Estructura de un tubo de rayos catódicos de persistencia variable o de memoria, en el que únicamente se representan los electrodos destinados a esta función.

Los **cátodos** son similares al que produce el haz principal siendo por lo tanto suficientemente conocidos.

La **rejilla Wehnelt**, común para los dos haces catódicos tiene como misión la de controlar la intensidad electrónica, con objeto de regular el brillo de la imagen sobre la superficie del electrodo de almacenamiento. Esto permite optimizar la observación de la imagen para todas las posibles velocidades de barrido.

El **ánodo acelerador** produce el efecto de dotar a los electrones de los dos haces la velocidad necesaria para obtener la imagen de la pantalla con la suficiente intensidad. Su forma de funcionamiento es muy similar a la de los ánodos del rayo principal.

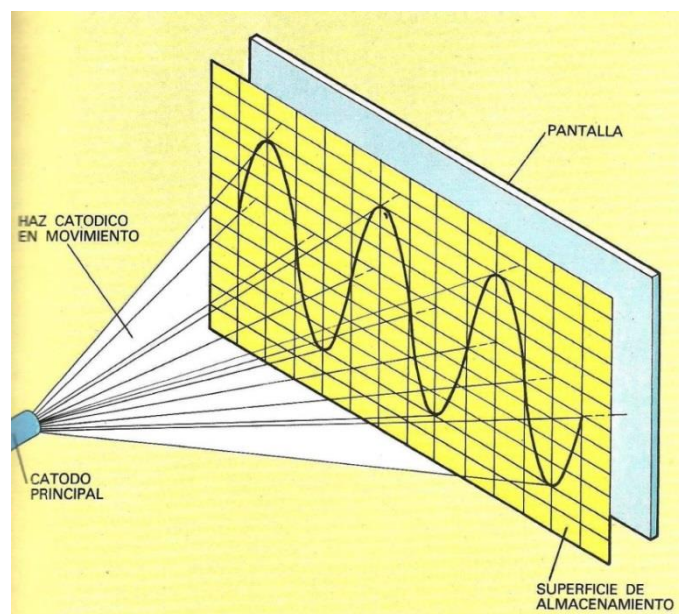
El **colimador** tiene como misión la de enfocar y acelerar los electrones hacia el electrodo de almacenamiento. Este electrodo está constituido por la capa interna de quadag del

tubo en toda la zona comprendida entre el final del cilindro de vidrio que forma el cuello del mismo y el electrodo postacelerador de almacenamiento.

El **electrodo postacelerador** efectúa una aceleración adicional con objeto de intensificar el haz y facilitar así la operación del colimador, completándose el enfoque de los haces de electrones.

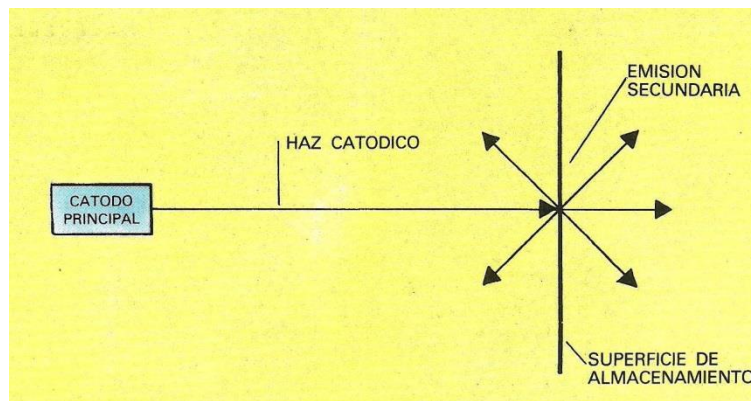
Electrodo de memoria

El **electrodo de almacenamiento** está compuesto por una rejilla sobre la que se encuentra depositada una capa de material dieléctrico cuya superficie más externa está metalizada, formando la **superficie de almacenamiento**. Este electrodo dispone de una conexión al exterior por la que recibe la tensión de polarización la cual no alcanzará a la superficie metalizada, aunque sí ejercerá un cierto efecto sobre ella por efecto electrostático o capacitivo.



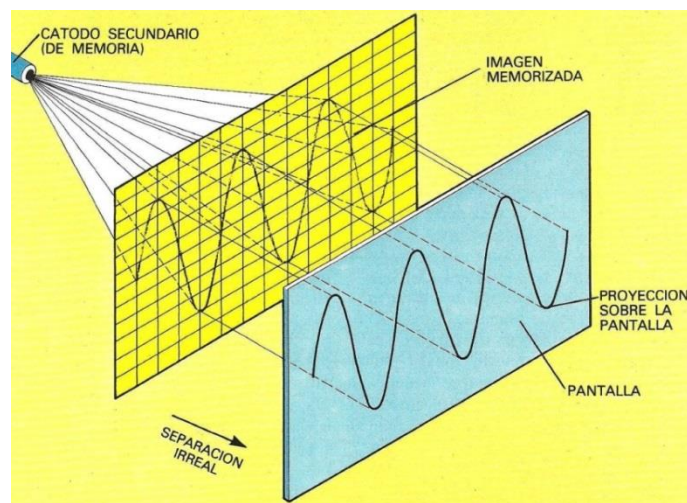
Grabación de una imagen sobre el electrodo de almacenamiento.

El principio de funcionamiento de la **superficie de almacenamiento** y de la memorización de la información sobre la misma está basado en el fenómeno de emisión secundaria de electrones. Si la incidencia del haz catódico sobre esta superficie produce una emisión secundaria en la que cada uno de los electrones incidentes provoca la emisión de más de un electrón secundario se obtendrá un incremento del potencial ya que el número de electrones desciende. Si por el contrario la cantidad de electrones que llega es superior a la que sale, el potencial disminuirá haciéndose más negativa.



El efecto de persistencia se produce a causa de la emisión secundaria originada en el electrodo de almacenamiento por la incidencia del haz principal.

El efecto de almacenamiento deseado se produce por la incidencia del haz principal, el cual provoca una intensa emisión secundaria haciendo que aparezca una acumulación de carga positiva únicamente en los puntos de incidencia del haz, con lo que quedará memorizada la forma de onda que se desee. La proyección de esta imagen sobre la pantalla se consigue mediante los rayos de electrones de los dos cátodos adicionales, los cuales podrán pasar únicamente por aquellos lugares de la **superficie de almacenamiento** cargados positivamente, siendo posteriormente acelerados por el electrodo intensificador, con lo que alcanzarán la capa de fósforos de la pantalla con la suficiente energía para reproducir la imagen.



Proyección sobre la pantalla de la imagen grabada mediante el barrido de uno de los haces catódicos secundarios.

Por lo tanto, la grabación de la imagen que se desea almacenar se produce mediante un electrodo interno que se carga eléctricamente al recibir la incidencia del haz catódico principal del tubo. Con otros haces de electrones adicionales que pasan a través de este electrodo se consigue reproducir la imagen original.

Controles externos

El control externo de las diferentes formas de operación de un osciloscopio de memoria se realiza normalmente a través de un selector que permite elegir entre tres funciones distintas de almacenamiento de señales.

El modo **PERSISTENCIA** está asociado a un control que permite variar el tiempo que se desea mantener la imagen sobre la pantalla. Suele emplearse para la observación de formas de onda de muy baja frecuencia, eliminando así la continua inestabilidad que produciría el barrido convencional. Se suele ajustar para que el tiempo de persistencia coincida con la aparición del siguiente barrido sobre la pantalla, con lo que el efecto resultante será una imagen perfectamente estable. Si se desea mantener la forma de onda sobre la pantalla durante un periodo de tiempo largo es necesario actuar sobre los modos de **ESCRITURA** (WRITE), después sobre **BORRADO** (ERASE) terminando la secuencia con la selección del modo **MEMORIA** (STORE) con lo que la imagen permanecerá un tiempo normalmente superior a una hora.

El modo **ESCRITURA** (WRITE) se emplea principalmente para memorizar señales que aparecen aisladamente y no vuelven a repetirse, por lo tanto el selector de disparo de la base de tiempos se deberá situar en la posición de disparo único, generando así un solo barrido. La persistencia se sitúa automáticamente en su máximo valor y la imagen permanecerá almacenada durante un tiempo normalmente superior a un minuto.

El modo **MEMORIA** (STORE) permite observar durante largos periodos de tiempo una señal previamente memorizada mediante el modo **ESCRITURA** (WRITE). A seleccionar este modo de funcionamiento se bloquean los dos canales de señales (A y B) así como la función **BORRADO** (ERASE).



Conjunto de mandos destinados al control de las diferentes formas de operación de memoria en un osciloscopio.

Memoria digital

En la actualidad también se utilizan memorias del tipo digital que guardan la información de la señal correspondiente a un barrido (el que se desee), pudiéndose visualizar en cualquier momento y durante el tiempo que sea necesario.

Para ello, un circuito muestrea la señal visualizada a una frecuencia suficientemente alta, de forma que el valor de la amplitud de cada punto es almacenada en binario en una memoria, de la que posteriormente y cuantas veces sea preciso, puede extraerse y mostrarse la señal que se “archivó”.

Calibración de osciloscopios

El osciloscopio, tanto convencional como de memoria, es un excelente instrumento que permite realizar medidas de tensión en los diferentes puntos de una forma de onda, así como de su frecuencia, gracias a las divisiones que contiene la retícula de la pantalla, asociadas a los mandos de amplitud vertical y de base de tiempos, los cuales disponen de unas posiciones de medida previamente definidas e indicadas sobre los propios botones de control. Sin embargo, para que este sistema de medida sea realmente útil y fiable es necesario que el osciloscopio esté perfectamente **calibrado**, con objeto de que todas las indicaciones de sus diferentes escalas sean reales y no induzcan a errores.

La **calibración** de un osciloscopio se realiza con el auxilio de unos instrumentos exteriores de alta precisión de los que se extraen las señales que van a ser observadas y medidas en la pantalla. Una vez que ya se dispone de una señal de amplitud y frecuencia conocidas se actuarán los potenciómetros internos de calibración, hasta que el número de divisiones que ocupa la señal en la pantalla, multiplicado por la escala seleccionada, coincida con el nivel de tensión o la frecuencia aplicada por el generador exterior, dándose así por calibrado el aparato.

Normalmente las precisiones que ofrece un osciloscopio tanto para realizar medidas de tensión como de frecuencia o periodo, están alrededor del $\pm 5\%$, lo que significa que será inevitable admitir un error de esta magnitud en cualquier medida realizada con el instrumento.

Por lo tanto, la calibración de un osciloscopio consiste en aplicarle unas señales de precisión, cuyas características se conocen y ajusta, a partir de ellas, el aparato, de forma que la medida realizada sobre la retícula de la pantalla sea lo más fiable posible.

Ejemplos de medición con un osciloscopio HAMEG

Medida de amplitudes.

Se conecta la señal que se desee medir al canal 1:

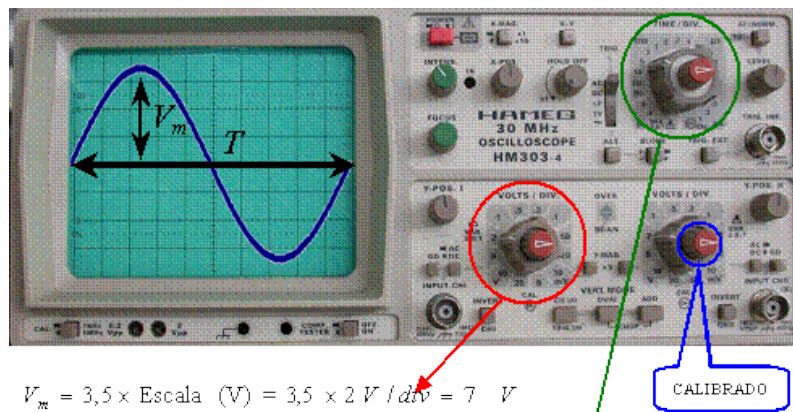
1. Se pulsa el interruptor power (1).
2. Se ajusta la intensidad luminosa mediante el mando de intensidad (2) y se focaliza la señal mediante el focalizador (3).
3. Se sitúa el mando (25) en GD (tierra = ground), con lo cual el osciloscopio muestra una señal constante de 0 V, que se debe centrar en la pantalla mediante los mandos de posición Y (21) y posición X (6).
4. Se sitúa el mando (25) en AC para señales alternas, y se ajusta el factor de escala vertical con el mando de amplitudes del canal 1 (26).
5. La amplitud será la medida desde el eje horizontal en 0 V hasta la altura máxima y se calcula en función del factor de escala (en V/div) del mando de amplitudes (26).

En la figura 27 se muestra un ejemplo de la medida de la amplitud de una señal.

Si se desea visualizar dos señales, se conecta la segunda señal al canal 2 (35) y tras conectar el botón dual (29) se procede de forma similar, utilizando ahora los mandos correspondientes al canal 2.

Medida del período de una señal.

El período es el tiempo que tarda en repetirse la señal (T en la figura siguiente). Para calcularlo se multiplica la longitud medida en la pantalla del osciloscopio por el factor de escala de la base de tiempos (conector 12 en la figura anterior). En la figura siguiente se muestra un ejemplo de la medida del periodo de una señal.



Medida de amplitud y periodo con el osciloscopio analógico Hameg

$$V_m = 3,5 \times \text{Escala (V)} = 3,5 \times 2 \text{ V/div} = 7 \text{ V}$$

$$T = 10 \times \text{Escala (s)} = 10 \times 5 \text{ ms/div} = 50 \text{ ms}$$

Determinación de la frecuencia y pulsación.

La frecuencia de una señal se define como la inversa del período: $f = 1/T$.

La pulsación se define como 2π multiplicado por la frecuencia: $\omega = 2\pi f$.

Medida del desfase entre dos señales de la misma frecuencia.

Dadas dos señales senoidales de la misma frecuencia (y misma pulsación ω):

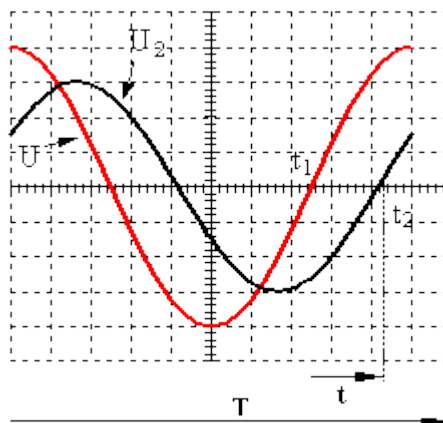
$$U_1 = U_{1m} \cos(\omega t + \varphi_1)$$

$$U_2 = U_{2m} \cos(\omega t + \varphi_2)$$

se llama desfase entre las dos ondas a la diferencia de fase entre ellas $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$.

El desfase entre dos señales de la misma frecuencia se puede medir de dos formas:

1. A partir de la representación dual de ambas señales. Ambas funciones se anulan en los instantes t_1 y t_2 respectivamente:



Medida del desfase

$$\omega t_1 + \varphi_1 = 90^\circ \quad \omega t_2 + \varphi_2 = 90^\circ$$

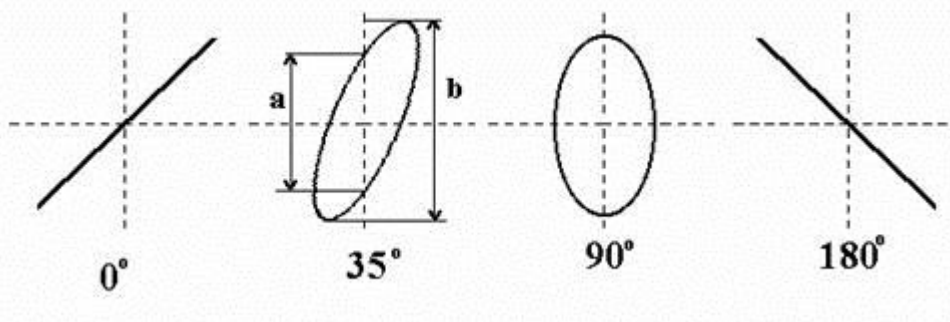
Si se resta:

$$\varphi_2 - \varphi_1 = -\omega(t_2 - t_1) = \text{desfase}$$

2. Mediante las figuras de Lissajous:

Las figuras de Lissajous pueden observarse en la pantalla del osciloscopio con el modo x-y (pulsando la tecla 5), de esta forma la señal del canal I se representa en el eje vertical y la del canal II en el eje horizontal.

Los diagramas siguientes son los resultados de dos señales de la misma frecuencia con ángulos de desfase de 0° , 35° , 90° y 180° .



Figuras de Lissajous.

Para hallar el ángulo de desfase entre las dos señales se mide las distancias a y b (segundo ejemplo correspondiente a 35°) y se realiza el siguiente cálculo:

$$\text{sen } \varphi = a/b; \quad \varphi = \arcsen a/b$$

ya que si se tiene en el eje horizontal una señal: $x = X \cos \omega t$ y otra en el eje vertical $y = Y \cos(\omega t + \varphi)$, aparece en la pantalla una figura similar a las mostradas en la figura anterior.

Considerando el instante $\omega t = -90$ se tiene que:

$$x = 0$$

$$y = Y \text{ sen } \varphi, \quad y = a/2, \quad Y = b/2,$$

$$\text{entonces: } \text{sen } \varphi = (y/Y) = (a/b)$$

$$\text{y por tanto, } \varphi = \arcsen (a/b)$$