

INSTRUMENTOS Y HERRAMIENTAS DE PROPÓSITO GENERAL



CONCEPTOS BÁSICOS DE LOS OSCILOSCOPIOS:

- 1. Introducción**
- 2. Osciloscopios analógicos y digitales**
- 3. Formas de onda**
- 4. Términos de rendimiento**
- 5. Sistemas y controles de un osciloscopio**
- 6. Técnicas de medición**

3°B – ELECTRÓNICA

2010



Carl Ferdinand Braun nació en Fulda, Alemania, el 6 de junio de 1850. Comenzó sus estudios superiores de ciencias en 1868 en la universidad de Marburgo y al año siguiente siguió sus estudios en Berlín, de la que obtuvo un doctorado en 1872.

En 1874 entró como profesor en el *Thomas Gymnasium* de Leipzig y ese mismo año publicó un artículo en el que por primera vez se expuso el fenómeno que se produce en el contacto entre la punta de un hilo de plata y un cristal semiconductor; la rectificación de una corriente alterna. El artículo despertó notable interés científico, pues el fenómeno contradecía la ley de Ohm. El uso práctico de este fenómeno estaba muy lejos y no fue hasta principios del siglo XX cuando se empezaron a usar contactos de ciertos metales y cristales como detectores de radio o rectificadores y hubo que esperar hasta 1948 para que se descubriera el efecto transistor.

A partir de 1877 ejerció como profesor en la universidad de Marburgo, en 1880 en la de Estrasburgo (Francia), en 1883 en la de Karlsruhe y en 1885 en la de Tubinga. Aquí permaneció diez años durante los cuales efectuó investigaciones en diversas áreas y hacia 1887 inventó un nuevo tipo de instrumento conocido posteriormente como electrómetro Braun (voltímetro electrostático) que representaba un importante avance sobre los instrumentos de ese tipo conocidos hasta entonces.

En 1895 volvió a la universidad de Estrasburgo como director del instituto de física, y fue allí en donde Braun empezó a experimentar con los rayos catódicos. En un artículo que publicó en febrero de 1897 describió un tubo de rayos catódicos (TRC) empleado en sus experimentos como oscilógrafo y que más tarde se denominaría tubo de Braun. Este TRC representó el diseño base del que derivarían los tubos de televisión, osciloscopios, etc.

Hacia finales 1897 Braun se interesó por un nuevo campo de investigación; la radiotelegrafía y

rápidamente diseñó un emisor en el que empleaba la descarga de botellas de Leiden a través de una bobina. La combinación de un condensador (botella de Leiden) y una bobina constituían un circuito oscilador.

En 1898 Braun consiguió establecer una comunicación a 800 metros, y a continuación solicitó una patente sobre su sistema.

A mediados de 1899 Braun y varios socios fundaron la compañía Prof. Brauns Telegraphie GmbH, al mismo tiempo el sistema radiotelegráfico de Braun era cada vez más efectivo. Poco tiempo después viendo las posibilidades comerciales de la empresa, los miembros de ésta y varios inversores forman un consorcio que en adelante se conocerá por su dirección telegráfica: Telebraun.

Pero a medida que pasaba el tiempo y las perspectivas del negocio crecían, las necesidades de financiación aumentaban y a finales de 1900 el consorcio de Telebraun se unió a Siemens para formar una nueva compañía.

En 1903, con el impulso del gobierno alemán, los dos sistemas de radiotelegrafía existentes en el país se unieron para formar la Gesellschaft für Drahtlose Telegraphie mbH. Esta compañía tenía como dirección telegráfica Telefunken, acrónimo del nombre de las antiguas compañías Telebraun y Funkentelegraphie GmbH. Telefunken sería el nombre que posteriormente adoptó esta compañía.

Mientras tanto Braun se iba convirtiendo en una figura pública, en 1905 fue nombrado rector de la universidad de Estrasburgo y en 1909 llegó al cenit de su carrera con la concesión del Premio Nobel de Física, premio que compartió con Guglielmo Marconi.

Con el estallido de la I Guerra Mundial en 1914 los aliados decidieron interrumpir las comunicaciones radiotelegráficas entre las estaciones de Telefunken en Alemania y Estados Unidos. Al tener conocimiento el gobierno alemán de que el propio Marconi iba a prestar declaración ante los tribunales norteamericanos, llamó a Braun a Berlín y le pidió que fuese a ese país a declarar a favor de los intereses de Alemania.

Braun no lo dudó ni un instante y en diciembre de 1914 se embarcó para Estados Unidos con la esperanza de un rápido regreso, cosa que nunca ocurrió pues una vez terminada su declaración ante los tribunales, a mediados de 1915, intentó obtener un salvoconducto británico para volver a su país y una y otra vez le fue denegado. La salud de Braun se fue deteriorando poco a poco hasta su fallecimiento. Murió en su casa de Brooklyn antes del final de la guerra en 1918.



1. INTRODUCCIÓN

¿Qué es un osciloscopio?, ¿qué se puede hacer con él? y ¿cómo funciona? En este apunte responderemos estas preguntas fundamentales.

El osciloscopio es básicamente un dispositivo de presentación de gráficos (dibuja un gráfico de una señal eléctrica). En la mayoría de las aplicaciones, el gráfico muestra cómo cambia una señal a medida que transcurre el tiempo: el eje vertical (Y) representa la tensión eléctrica y el horizontal (X) representa el tiempo. La intensidad o luminosidad de la visualización a veces se llama eje Z (ver figura 1). Este gráfico sencillo puede decir mucho sobre una señal. Por ejemplo, a través del análisis de éste podemos determinar:

- Los valores de tiempo (período) y tensión de una señal.
- La frecuencia de una señal oscilante.
- Cuánta corriente continua (C.C) y corriente alterna (C.A) configuran una señal.
- Cuanto ruido hay presente en una señal y si el ruido cambia con el tiempo, etc.

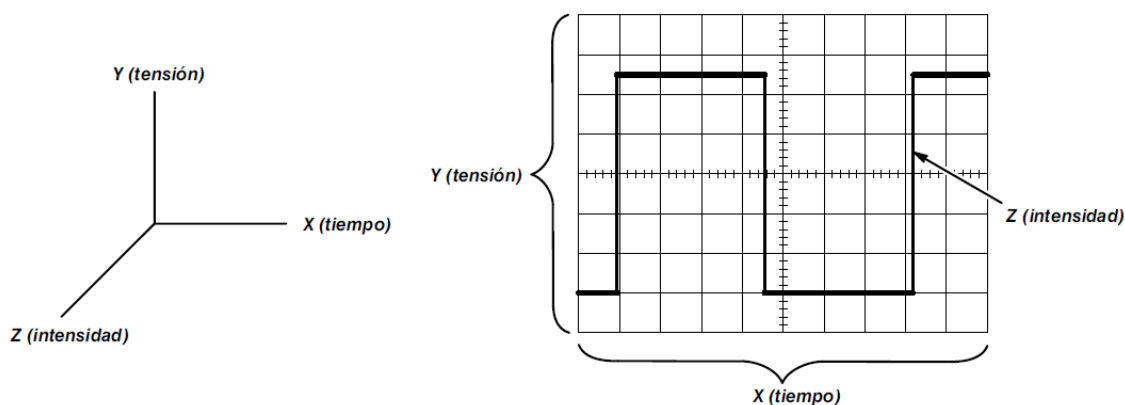


Figura 1.- Componentes X, Y y Z de una forma de onda en pantalla.

El osciloscopio se parece mucho a un televisor pequeño, excepto que tiene una cuadrícula dibujada en la pantalla y más controles que un televisor. El panel frontal de un osciloscopio normalmente tiene secciones de control divididas en vertical, horizontal y disparo. También hay controles de presentación de la imagen y conectores de entrada. Trate de localizar estas secciones del panel frontal en la siguiente figura y en su osciloscopio.

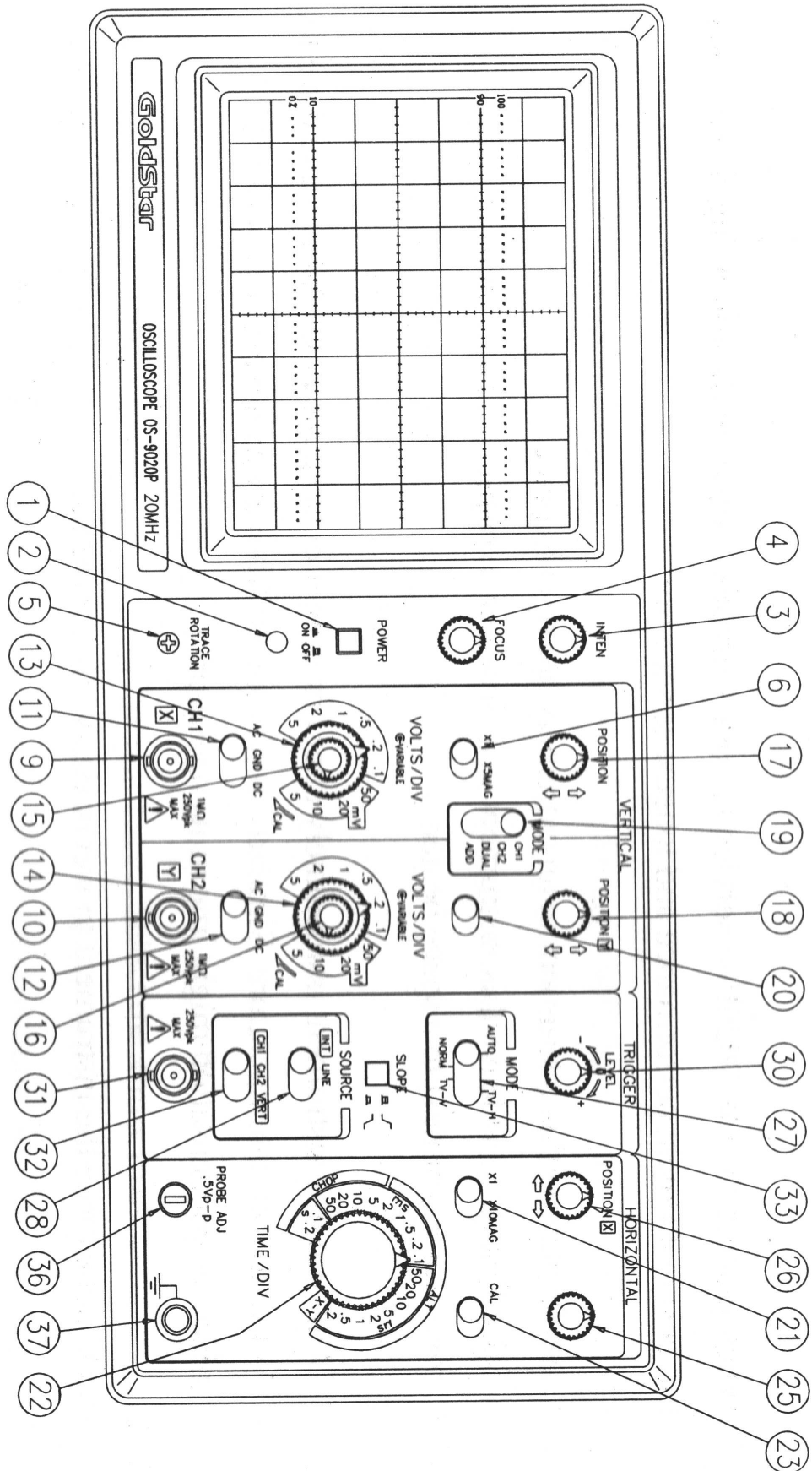
1.1 ¿QUÉ SE PUEDE HACER CON ÉL?

Los osciloscopios son herramientas indispensables para cualquiera que trabaje en diseño, fabricación o reparación de equipos electrónicos. Sin embargo, la utilidad de un osciloscopio no está limitada al mundo de la electrónica. Con el transductor adecuado, un osciloscopio puede medir todo tipo de fenómenos. Un transductor es un dispositivo que genera una señal eléctrica en respuesta a un estímulo físico, tal como un sonido, una fuerza, luz, o calor. Un micrófono, por ejemplo, es un transductor que convierte un sonido en una señal eléctrica.

Los osciloscopios son utilizados por físicos, técnicos de reparación, ingenieros, etc. Por ejemplo, un ingeniero mecánico puede utilizar un osciloscopio para medir las vibraciones de un motor. Un investigador médico puede utilizar un osciloscopio para medir las ondas cerebrales. Las posibilidades no tienen límites.



E.E.T Nº 460 "GUILLERMO LEHMANN"
Departamento de Electrónica
Instrumentos y herramientas de propósito general





2. OSCILOSCOPIOS ANALÓGICOS Y DIGITALES

Los equipos electrónicos pueden clasificarse en dos categorías: analógicos y digitales. El equipo analógico trabaja con voltajes que varían continuamente, mientras que el equipo digital trabaja con números binarios discretos que representan muestras de voltaje. Un tocadiscos convencional es un dispositivo analógico, mientras que un reproductor de discos compactos es un dispositivo digital.

Los osciloscopios se pueden clasificar de una forma similar en analógicos y digitales. Para muchas aplicaciones, dará igual un osciloscopio analógico que uno digital. Sin embargo, cada uno de ellos tiene características únicas que lo pueden hacer más o menos conveniente para aplicaciones específicas.

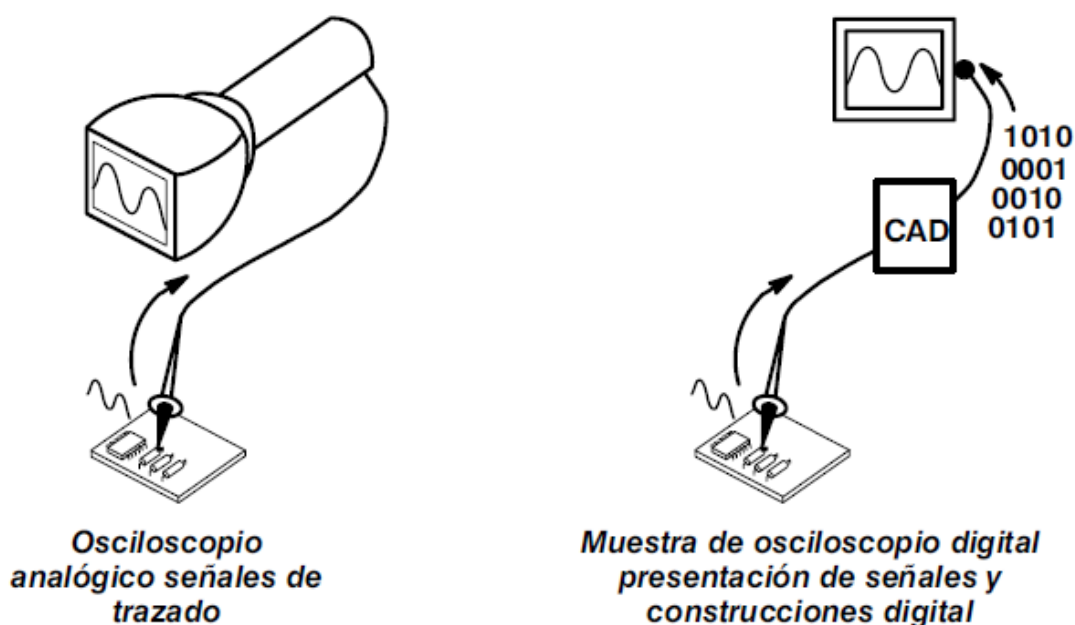


Figura 2.- Los osciloscopios analógicos “dibujan” señales, mientras que los osciloscopios digitales muestran señales y reconstruyen su representación.

2.1. EL OSCILOSCOPIO ANALÓGICO

Un osciloscopio analógico trabaja aplicando el voltaje medido de la señal directamente al eje vertical de un haz electrónico que se mueve de izquierda a derecha a través de la pantalla del osciloscopio, usualmente un tubo de rayos catódicos (TRC). La parte posterior de la pantalla está tratada con fósforo luminoso que brilla siempre que el haz electrónico incide sobre ella. El voltaje de la señal desvía el haz hacia arriba y hacia abajo proporcionalmente y conforme se mueve horizontalmente a través de la pantalla, trazando así la forma de onda en la pantalla. Cuanto más frecuentemente incida el haz sobre un punto específico de la pantalla, más brillante aparecerá dicha posición.

El TRC limita el rango de frecuencias que puede mostrar un osciloscopio analógico. En frecuencias muy bajas, la señal aparece como un punto brillante, de movimiento lento, que resulta difícil distinguir como una forma de onda. En frecuencias altas, la velocidad de escritura del TRC define el límite. Cuando la frecuencia de la señal excede la velocidad de escritura del TRC, la presentación se vuelve demasiado tenue en intensidad como para ser vista. Los osciloscopios analógicos más rápidos pueden presentar frecuencias de hasta alrededor de 1 GHz.



Cuando la sonda de un osciloscopio se conecta a un circuito, la señal del voltaje viaja a través de la sonda hasta el sistema vertical del osciloscopio. Dependiendo de cómo esté configurada la escala vertical (control de voltios/div), un atenuador reducirá el voltaje de la señal y un amplificador lo aumentará.

Seguidamente, la señal va directamente a las placas deflectoras verticales del TRC. El voltaje aplicado a estas placas de deflexión hará que el punto luminoso se mueva a través de la pantalla. Este punto luminoso es creado por un haz de electrones que incide sobre el fósforo luminoso en el interior del TRC.

La señal se desplaza también al sistema de disparo para iniciar, o disparar, un barrido horizontal. El barrido horizontal es un término que se refiere a la acción del sistema horizontal que permite que el punto luminoso se mueva de izquierda a derecha de la pantalla del osciloscopio. El disparo del sistema horizontal hace que la base de tiempos horizontal mueva el punto luminoso de izquierda a derecha de la pantalla dentro de un intervalo de tiempo específico. Muchos barridos en rápida secuencia harán que el movimiento del punto luminoso parezca una línea continua. A altas velocidades, el punto luminoso puede barrer la pantalla hasta 500.000 veces por segundo.

Conjuntamente, la acción de barrido horizontal y la acción de deflexión vertical trazan en la pantalla un gráfico de la señal. El disparo es necesario para estabilizar una señal repetitiva; así se asegura que el barrido empieza siempre en el mismo punto de la señal repetitiva, lo que resulta en una imagen clara, como se muestra en la figura 4.

Adicionalmente, los osciloscopios analógicos tienen controles de enfoque e intensidad que se pueden ajustar para crear una presentación nítida y legible.

A menudo, se prefieren los osciloscopios analógicos cuando resulta importante mostrar variaciones de señales rápidas en "tiempo real", es decir, conforme ocurren.

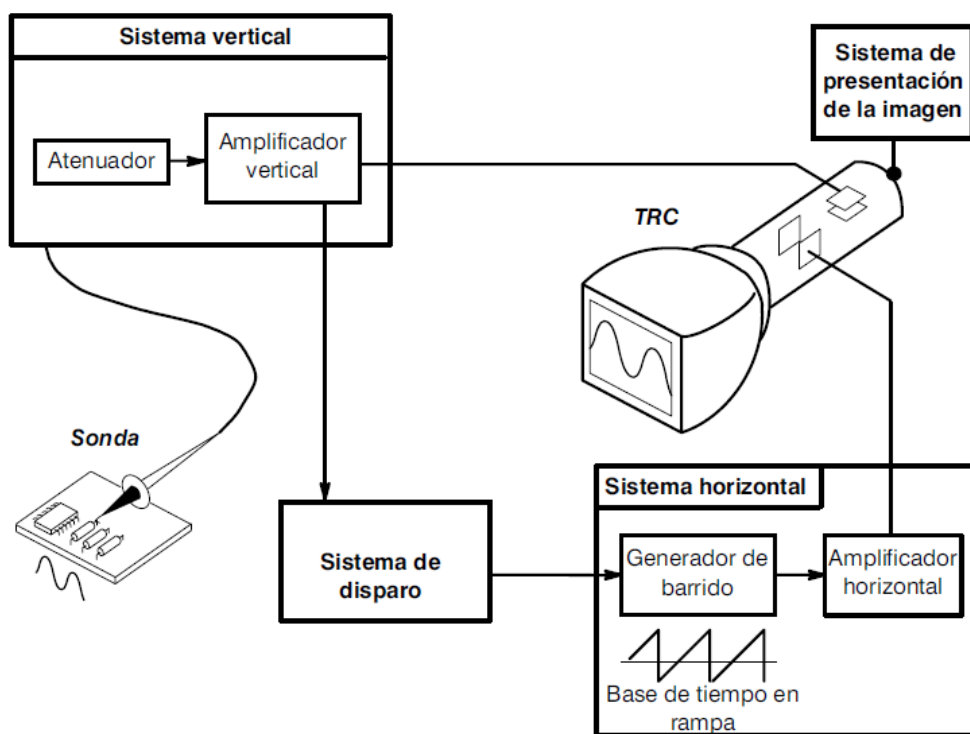


Figura 3.- Diagrama en bloques de un osciloscopio analógico.

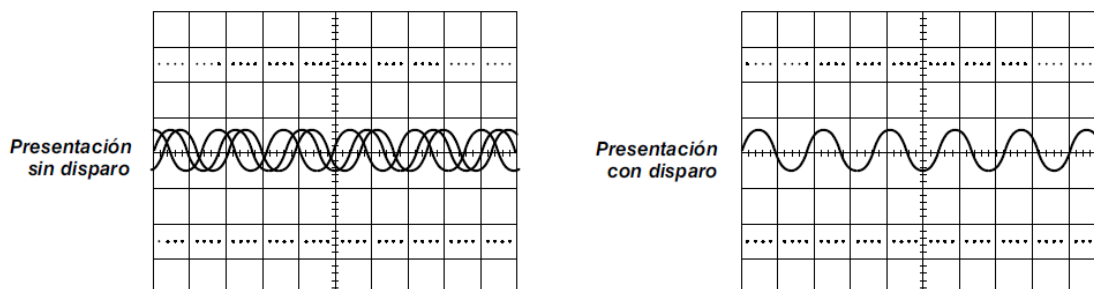


Figura 4.- El disparo estabiliza una forma de onda repetitiva.

2.2. EL OSCILOSCOPIO DIGITAL

Alguno de los sistemas del osciloscopio digital son iguales a los del osciloscopio analógico; no obstante, el osciloscopio digital contiene sistemas de procesamiento de datos adicionales (ver figura 5). Con estos sistemas adicionales, el osciloscopio digital reúne datos de toda la forma de onda y luego los muestra en la pantalla.

Cuando se conecta la sonda de un osciloscopio digital a un circuito, el sistema vertical ajusta la amplitud de la señal, tal como lo hace el osciloscopio analógico.

Luego, el conversor analógico-digital (ADC) en el sistema de adquisición toma muestras de la señal a intervalos discretos de tiempo y convierte la tensión de la señal en estos puntos a valores digitales llamados *puntos de muestra*. El reloj de muestra del sistema horizontal determina con qué frecuencia el ADC toma las muestras. La velocidad a la que marcha el reloj se llama velocidad de muestreo, y se mide en muestras por segundo.

Los puntos de muestreo del ADC están almacenados en la memoria como *puntos de la forma de onda*. Estos puntos de la forma de onda pueden estar constituidos por uno o más puntos de muestreo.

El conjunto de puntos de la forma de onda constituye un *registro* de la forma de onda. El número de puntos de la forma de onda utilizados para formar el registro se llama *longitud del registro*. El sistema de disparo determina los puntos de comienzo y final del registro. La pantalla recibe estos puntos de registro una vez que han sido almacenados en memoria.

Según las características del osciloscopio, es posible que tenga lugar algún procesamiento adicional de los puntos de muestreo con el fin de mejorar la imagen. La técnica digital permite que el osciloscopio pueda representar cualquier frecuencia dentro de su rango, con estabilidad, brillantez y claridad. Para señales repetitivas, el ancho de banda del osciloscopio digital es una función del ancho de banda analógico de los componentes de entrada del osciloscopio, comúnmente conocido como el punto de atenuación a -3dB. Para eventos transitorios y de disparo único, tales como pulsos y escalones, el ancho de banda puede verse limitado por la velocidad de muestreo del osciloscopio.

Básicamente, con un osciloscopio digital al igual que con uno analógico, es necesario ajustar las configuraciones vertical, horizontal y de disparo para tomar una medida.

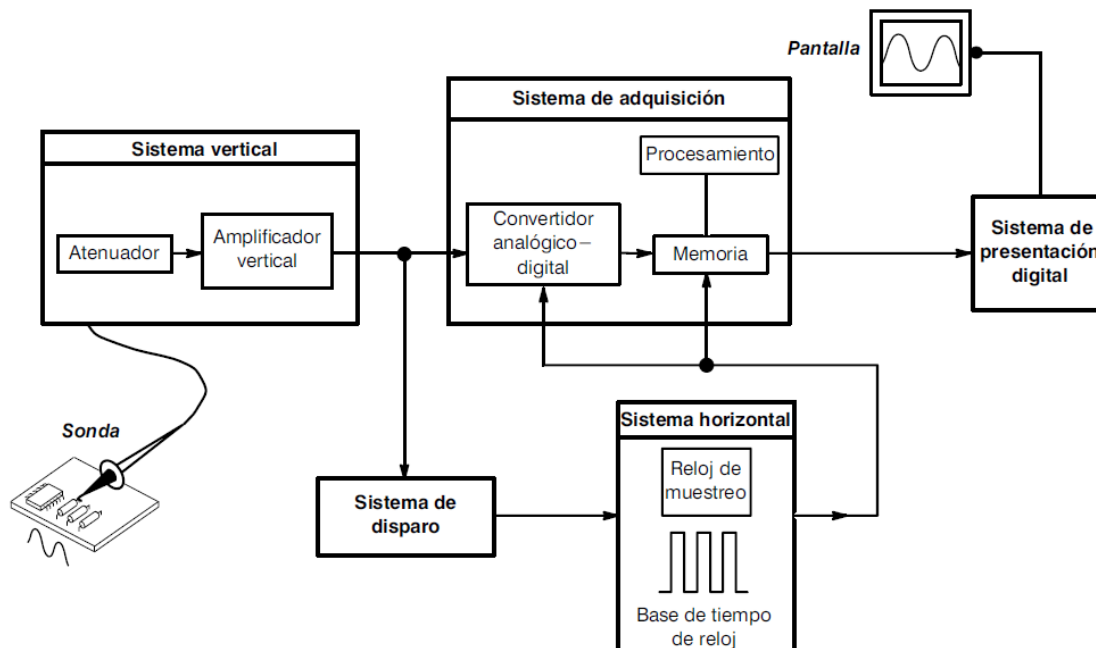


Figura 5.- Diagrama en bloques de un osciloscopio digital.

3. FORMAS DE ONDA

Un osciloscopio mide ondas de tensión. 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. La figura 6 muestra las formas de onda más comunes.

Las señales senoidales o sinusoidales son las ondas fundamentales debido a varias razones: poseen 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 los tomacorrientes domiciliarios es senoidal, las señales de prueba producidas por el circuito oscilador de un generador de funciones son senoidales, la mayoría de las fuentes de potencia de C.A (corriente alterna) producen señales senoidales, etc. La señal senoidal amortiguada es un caso especial de este tipo de ondas.

Una onda cuadrada es otra forma de onda habitual. Básicamente, una onda cuadrada es un voltaje que aumenta y disminuye (o que sube y baja) a intervalos regulares. Es una onda estándar para verificar amplificadores; los buenos amplificadores aumentan la amplitud de una onda cuadrada con una mínima distorsión. La circuitería de televisión, radio y computadoras utiliza a menudo ondas cuadradas como señales de reloj. La onda rectangular es como la onda cuadrada, excepto que los intervalos entre tiempos de subida y bajada no son de la misma longitud. Esto es particularmente importante cuando se analiza circuitería digital.



Las formas de onda diente de sierra y triangular se producen en circuitos diseñados para controlar voltajes linealmente, como pueden ser, por ejemplo, el barrido horizontal de un osciloscopio analógico o el barrido tanto horizontal como vertical de un televisor. Las transiciones entre el nivel mínimo y máximo de la señal cambian a un ritmo constante. Estas transiciones se denominan *rampas*. La onda diente de sierra es un caso especial de señal triangular con una rampa descendente de mucha más pendiente que la rampa ascendente.

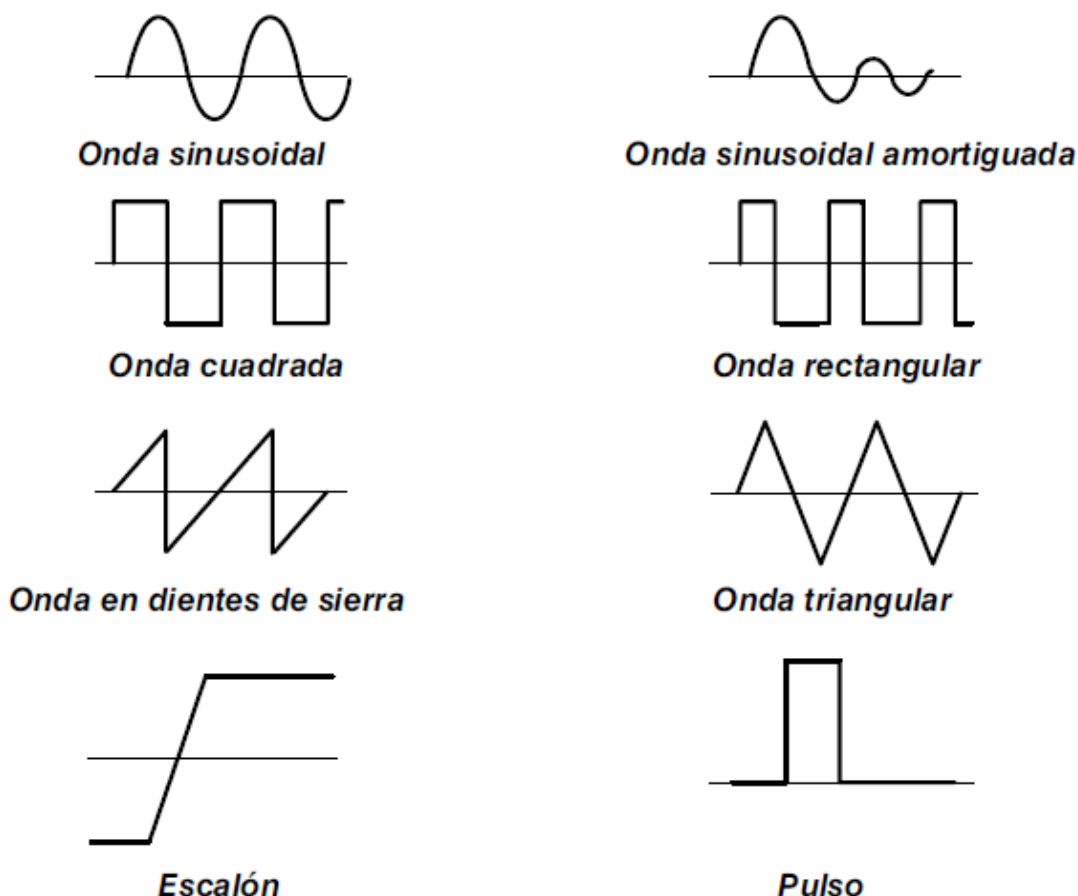


Figura 6.- Formas de onda más comunes.

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 una computadora ó también un pequeño defecto en un circuito (por ejemplo un falso contacto momentáneo). Es común encontrar señales de este tipo en computadoras, equipos de rayos X y de comunicaciones.

3.1 MEDIDAS DE FORMAS DE ONDA

Se utilizan muchos términos para describir los tipos de medidas que se pueden realizar con un osciloscopio. Esta sección describe algunas de las medidas y términos más comunes.



3.1.1 Frecuencia y período

Si una señal se repite, tiene una frecuencia. Esta frecuencia se mide en ciclos (Hz, de Hertcios), y equivale al número de veces que la señal se repite en un segundo, lo que se conoce como ciclos por segundo. Una señal repetitiva también tiene un período, que es la cantidad de tiempo que tarda la señal en completar un ciclo. El período y la frecuencia son recíprocos el uno con el otro, por lo que $1/\text{período}$ es igual a la frecuencia, y $1/\text{frecuencia}$ es igual al período. Por ejemplo, la onda sinusoidal de la figura 7 tiene una frecuencia de 3 Hz y un período de $1/3$ de segundo.

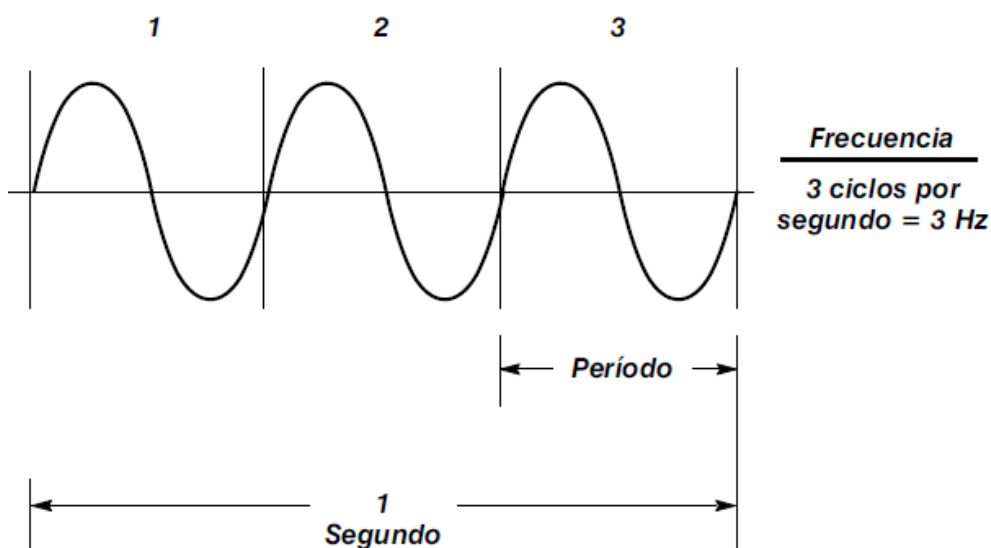


Figura 7.- Frecuencia y período.

3.1.2 Voltaje y amplitud

El voltaje es el cambio del potencial eléctrico (o energía de la señal) entre dos puntos en un circuito. Generalmente, uno de estos puntos es tierra, o cero voltios, pero no siempre. Muchas veces se desea medir el voltaje desde el pico máximo al pico mínimo de una forma de onda, lo que se conoce como el voltaje pico a pico.

La amplitud se refiere a la cantidad de voltaje entre dos puntos de un circuito. La amplitud comúnmente expresa el voltaje máximo de una señal medido desde tierra, o cero voltios. La forma de onda de la figura 8 tiene una amplitud de 1 V y un voltaje pico a pico de 2 V.

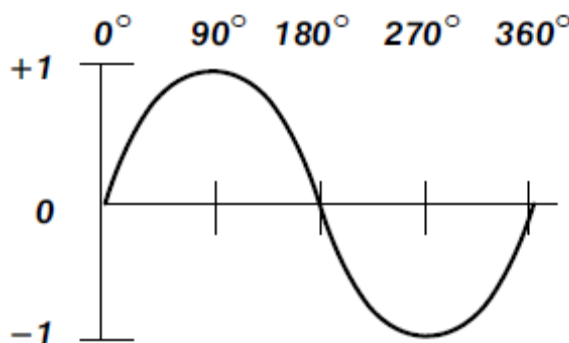


Figura 8.- Amplitud y fase de una señal senoidal.



3.1.3 Fase

La mejor forma de explicar una fase es viendo una onda sinusoidal. El nivel de voltaje de las ondas sinusoidales está basado en un movimiento circular. Dado que un círculo tiene 360° , un ciclo de una onda sinusoidal tiene también 360° , como se muestra en la figura 8. Utilizando los grados, es posible referirse al ángulo de fase de una onda sinusoidal cuando se quiere describir cuánto ha transcurrido de ese período.

El desplazamiento de fase describe la diferencia en tiempo entre dos señales similares. La forma de onda de la figura 9 denominada "corriente" se dice que está 90° desfasada con la forma de onda denominada "voltaje", debido a que estas ondas alcanzan valores similares en sus ciclos, separados exactamente por $1/4$ de ciclo ($360^\circ/4 = 90^\circ$). El desplazamiento de fase es común en electrónica.

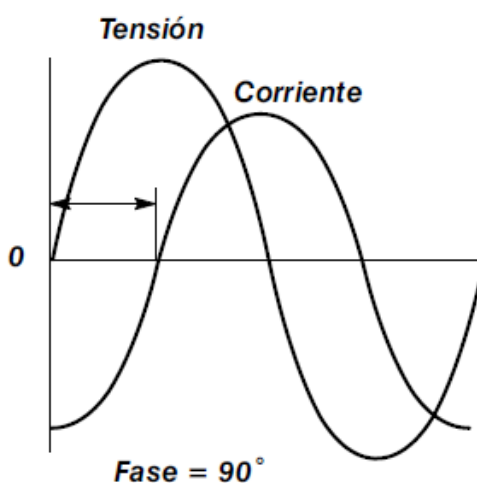


Figura 9.- Desplazamiento de fase.

4. TÉRMINOS DE RENDIMIENTO

Los términos definidos en esta sección nos permitirán comparar diferentes modelos de osciloscopios.

4.1 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).

4.2 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 mostrar con exactitud pulsos cuyo tiempo de subida sea más rápido que el tiempo de subida especificado para el osciloscopio.



4.3 SENSIBILIDAD VERTICAL

La sensibilidad vertical indica hasta qué punto el amplificador vertical puede amplificar una señal débil. La sensibilidad vertical suele darse en milivoltios (mV) por división. La tensión más pequeña que puede detectar un osciloscopio de uso general es normalmente de 5 mV/div (llegando a 2 mV/div).

4.4 VELOCIDAD DE BARRIDO

Para los osciloscopios analógicos, esta especificación indica la velocidad máxima a la que el trazado puede barrer la pantalla, permitiéndole ver la imagen con toda nitidez. La velocidad máxima de barrido de un osciloscopio se suele dar en nanosegundos/div.

4.5 PRECISIÓN DE GANANCIA

La precisión de ganancia indica la precisión con la que el sistema vertical atenúa o amplifica la señal. Se suele indicar como un porcentaje de error.

4.6 BASE DE TIEMPO O PRECISIÓN HORIZONTAL

La precisión en la base de tiempo o precisión horizontal indica la precisión con que el sistema horizontal representa los eventos de la señal en relación al tiempo. Se suele indicar como un porcentaje de error.

4.7 VELOCIDAD DE MUESTREO

En los osciloscopios digitales, la velocidad de muestreo indica cuántas muestras por segundo puede tomar el ADC (y por lo tanto el osciloscopio). Las velocidades máximas de muestreo suelen darse en megamuestras por segundo (MM/s). Cuanto más rápidamente pueda tomar muestras el osciloscopio, con mayor precisión podrá representar los detalles de una señal rápida. La velocidad mínima de muestreo también puede ser importante si se necesita observar señales que cambian lentamente en largos períodos de tiempo. Normalmente, la velocidad de muestreo cambia con los cambios en el control seg/div para mantener un número constante de puntos de forma de onda en el registro de la forma de onda.

4.8 RESOLUCIÓN DEL ADC (O RESOLUCIÓN VERTICAL)

La resolución, en bits, del ADC (y por lo tanto del osciloscopio digital) indica con que grado de precisión el instrumento puede transformar las tensiones de entrada a valores digitales. Técnicas de cálculo pueden mejorar la resolución efectiva.

4.9 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.

5. SISTEMAS Y CONTROLES DE UN OSCILOSCOPIO

Un osciloscopio básico se compone de cuatro sistemas diferentes: el sistema vertical, el sistema horizontal, el sistema de disparo, y el sistema de presentación. La comprensión de cada uno de estos sistemas le permitirá aplicar el osciloscopio con efectividad para abordar problemas de medidas específicas. Recuerde que cada uno de estos sistemas contribuye a la



habilidad del osciloscopio para reconstruir una señal con precisión. Esta sección describe brevemente los controles y sistemas básicos que se pueden encontrar en los osciloscopios analógicos. Algunos controles adicionales no son tratados en esta sección.

5.1 CONFIGURACIÓN INICIAL DE LOS CONTROLES

Luego de encender el osciloscopio, pulsando el interruptor 1 (indicador 2), observe al panel frontal. Observe los conectores de entrada del osciloscopio (9 y 10), ahí es donde se conectan las sondas. La mayoría de los osciloscopios tiene al menos dos canales de entrada, y cada canal puede mostrar una forma de onda en la pantalla. Los canales múltiples son muy útiles para la comparación de formas de onda.

Algunos osciloscopios tienen teclas de autoconfiguración (AUTOSET) que pueden configurar los controles automáticamente para adaptarse a la señal de entrada. Si su osciloscopio no dispone de esta capacidad, resultará útil disponer los controles en posiciones normales antes de empezar a realizar medidas.

Las instrucciones generales para configurar el osciloscopio en sus posiciones normales son:

- Configuración del osciloscopio para presentar el canal 1 (VERTICAL MODE, control 19).
- Configuración de la escala de voltios/división a una posición de rango medio (control 22). Por ejemplo 0.1ms/div.
- Configuración del acoplamiento de entrada del canal 1 a CC o DC (control 11).
- Configuración del modo de disparo a automático (TRIGGER MODE, control 27).
- Configuración de la fuente de disparo al canal 1 (TRIGGER SOURCE, control 32).
- Apagado de la variable voltios/división (control 15, para el canal 1).
- Apagado de todos los controles de amplificación (control 6, para el canal 1, en X1 y control 21 en X1).
- Configuración del control de intensidad a un nivel de representación normal (control 3).
- Ajuste del control de enfoque para obtener una imagen nítida (control 4).

Estas son instrucciones generales para la configuración de cualquier osciloscopio.

5.2 SONDAS O PUNTAS

Con los pasos detallados anteriormente nos encontramos en condiciones de conectar la sonda de medida al conector de entrada del canal 1 (CH1, 9). Es muy importante utilizar las sondas diseñadas para trabajar específicamente con el osciloscopio. Una sonda no es un simple cable con una pinza, sino que se trata de un conector de alta calidad específicamente diseñado para evitar ruidos o interferencias que puedan perturbar la medida.

Normalmente, cualquier osciloscopio incluye como accesorio estándar una o dos sondas pasivas. Las sondas pasivas son una herramienta excelente para pruebas de uso general y para la localización de fallas. Para tomar medidas o hacer pruebas más específicas, existen otros tipos de sondas. Dos ejemplos son las sondas activas y las sondas de corriente. En este apartado solo se analizarán las sondas pasivas.

La mayoría de las sondas pasivas tienen algún factor de atenuación, tales como 10X, 100X, etc. Convencionalmente, en los factores de atenuación, tales como la sonda atenuadora 10X, la X se ubica detrás del factor. Por el contrario, en los factores de amplificación, la X se ubica delante.



La sonda atenuadora 10X (se lee "por diez") minimiza la carga del circuito, en comparación con una sonda 1X, y se trata de una excelente sonda pasiva de propósito general. La carga del circuito se hace más pronunciada en el caso de fuentes de señal de frecuencias elevadas o impedancias altas. Por lo tanto, se deberá analizar estas interacciones de carga sonda/señal antes de seleccionar una punta. La sonda atenuadora 10X mejora la exactitud de las medidas, pero también reduce en un factor de 10 la amplitud de la señal visualizada en pantalla.

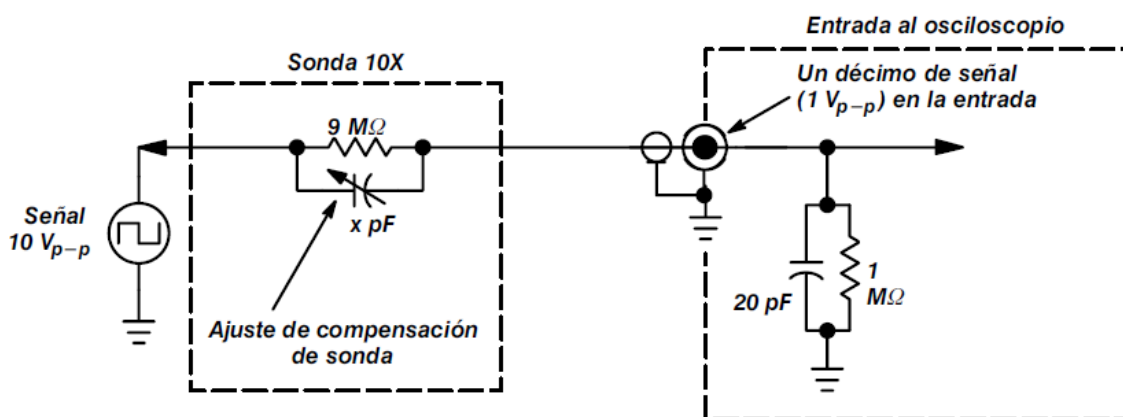


Figura 10.- Red típica de relación 10 a 1 de sonda/osciloscopio.

Debido a la atenuación en la señal, la sonda atenuadora 10X dificulta la visualización de señales menores de 10 milivoltios pico a pico. La sonda 1X es similar a la sonda atenuadora 10X, pero carece del circuito de atenuación. Sin este circuito se introducen más interferencias al circuito bajo prueba. La mayoría de las sondas ofrecen la ventaja de poder cambiar la atenuación entre 1X y 10X en la punta de la sonda. Cuando se utilicen este tipo de sondas hay que asegurarse que la llave conmutadora se encuentre en la posición correcta.

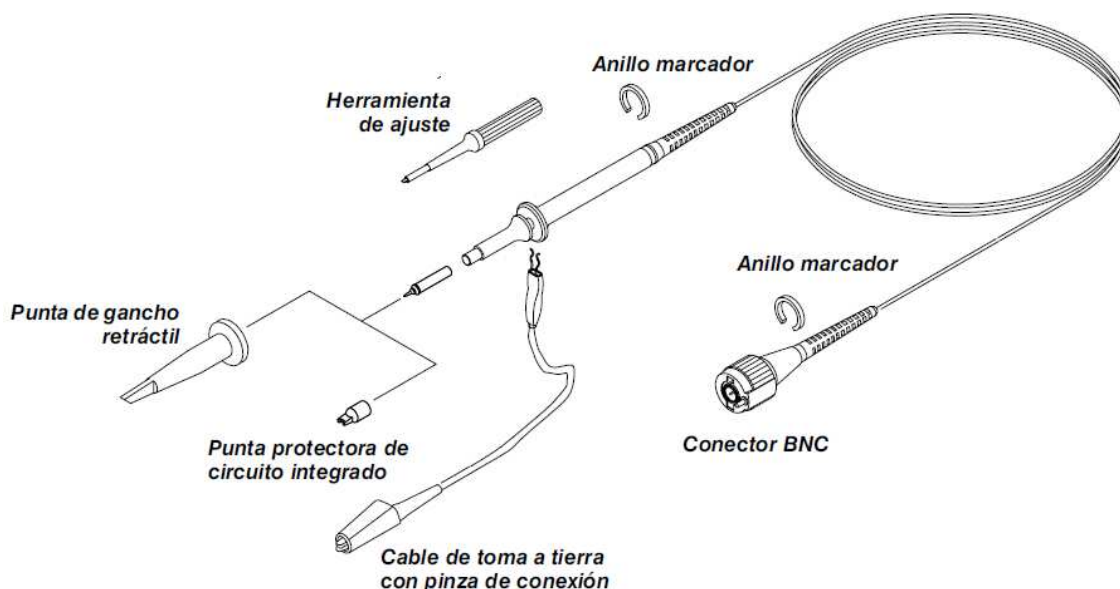


Figura 11.- Sonda pasiva típica con accesorios.



5.2.1 Compensación de la sonda

Antes de utilizar una sonda pasiva, será necesario compensarla, es decir, balancear sus propiedades eléctricas con las de un osciloscopio en particular. Se debería tener la costumbre de compensar la sonda cada vez que se configura un osciloscopio. Una sonda mal compensada puede significar que las medidas sean menos precisas.

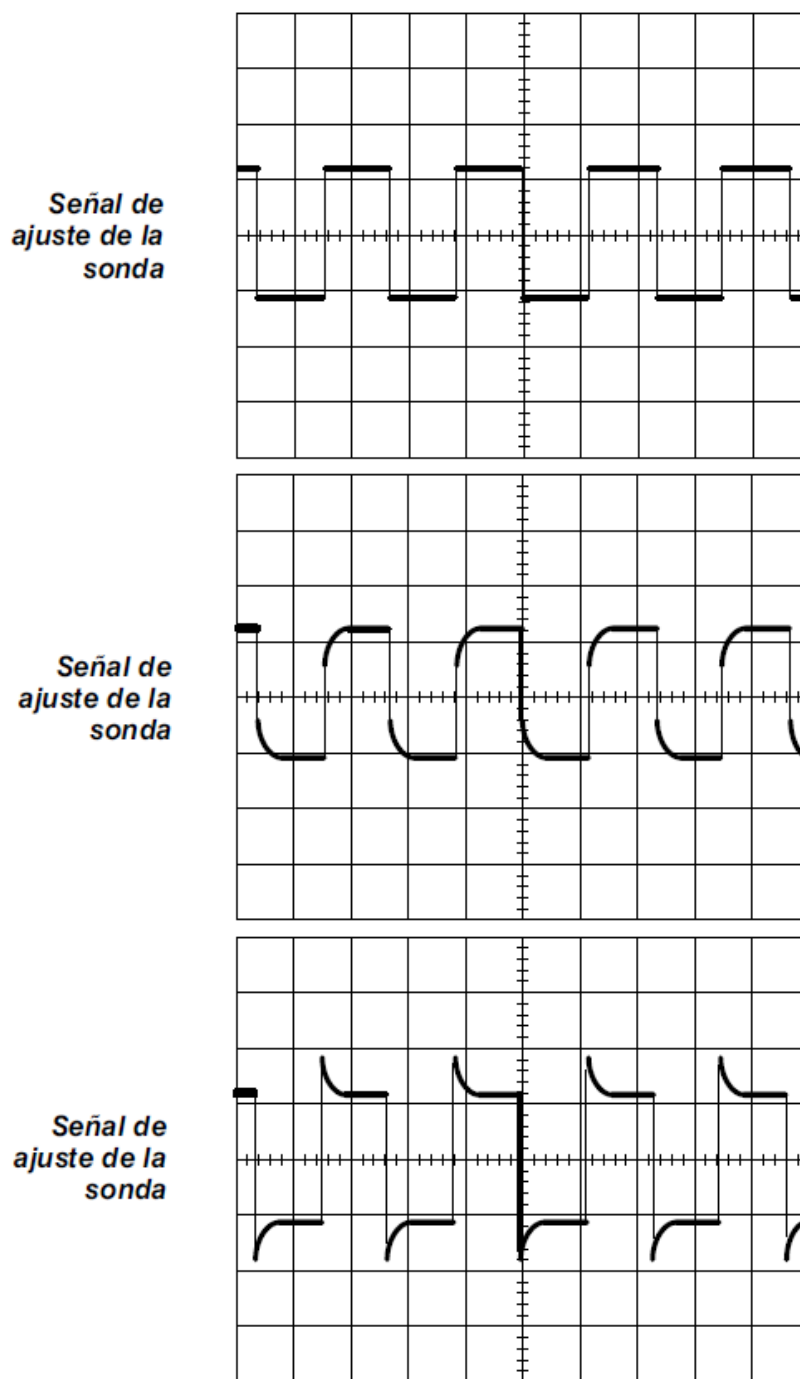


Figura 12.- De arriba hacia abajo se observa: sonda correctamente compensada; sonda subcompensada y sonda sobrecompensada.



La mayoría de los osciloscopios disponen de una señal de referencia de onda cuadrada en un terminal del panel frontal (36), que se utiliza para compensar la sonda de la siguiente forma:

- Conecte la sonda a un canal vertical.
- Conecte la punta de la sonda al punto de compensación (PROBE ADJ .5Vp-p; 36).
- Conecte la pinza de tierra de la sonda a un punto de tierra (37).
- Visualice la señal de referencia de onda cuadrada.
- Realice los ajustes adecuados en la sonda para que las esquinas de la onda cuadrada sean un ángulo recto.

5.3 CONTROLES DE PRESENTACIÓN

Los sistemas de presentación de la imagen varían entre los osciloscopios analógicos y digitales. Entre los controles comunes se encuentran:

- Un control de intensidad (INTEN, 3), para ajustar el brillo de la forma de onda. Conforme se incrementa la velocidad de barrido de un osciloscopio analógico, se necesita aumentar el nivel de intensidad.
- Un control de enfoque (FOCUS, 4), para ajustar la nitidez de la forma de onda, y un control de rotación de la traza (TRACE ROTATION, 5), para alinear la traza de la forma de onda con el eje horizontal de la pantalla. La posición del osciloscopio con relación al campo magnético de la tierra afecta a la alineación de la forma de onda. Los osciloscopios digitales, que utilizan pantallas basadas en barrido y LCD, pueden no disponer de estos controles porque el total de la pantalla está predeterminado como en la pantalla de un ordenador personal.
- Otros controles de presentación pueden permitir el ajuste de la intensidad de iluminación de la retícula y la presentación o ausencia de cualquier información en la pantalla, tales como los menús.

5.4 CONTROLES VERTICALES

Los controles verticales se utilizan para situar y definir verticalmente la escala de la forma de onda. Además, también se utilizan para configurar el acoplamiento de entrada y otros acondicionadores de la señal, descritos más adelante en esta sección.

5.4.1 Posición y voltios por división

El control de posición vertical (17 para canal 1 y 18 para canal 2) permite mover la forma de onda hacia arriba o hacia abajo para situarla en cualquier lugar de la pantalla.

El control voltios por división (escrito generalmente como VOLTS/DIV, siendo el 13 para el canal 1 y el 14 para el canal 2) varía el tamaño de la forma de onda en la pantalla. Un buen osciloscopio de propósito general puede mostrar con precisión niveles de señal desde 4 milivoltios hasta 40 voltios.

La configuración volts/div es un factor de escala. Si la configuración volts/div es 5 voltios, entonces cada una de las 8 divisiones verticales representará 5 voltios y la pantalla podrá mostrar un total de 40 voltios desde arriba hasta abajo, suponiendo que la retícula tenga 8 divisiones principales. Si la configuración es de 0,5 volts/div, la pantalla podrá presentar 4 voltios desde arriba hasta abajo, etc. El voltaje máximo que se puede presentar en la pantalla es el valor de volts/div multiplicado por el número de divisiones verticales. Hay que tener en cuenta que la sonda que utilice (1X o 10X), también puede influir en el factor de la escala. Se deberá dividir la escala volts/div por el factor de atenuación de la sonda, si el osciloscopio no realiza esta función por sí mismo.



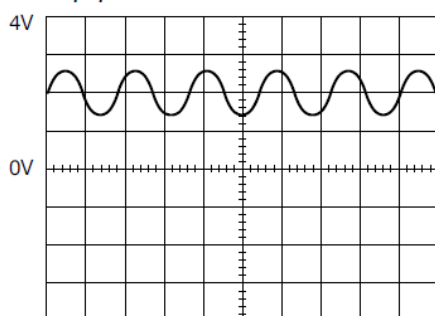
Con frecuencia, la escala volts/div tiene un control de ganancia variable, o de ganancia fina (control 15 para el canal 1 y 16 para canal 2), para escalar la presentación de la señal a una magnitud exacta de divisiones de amplitud. Este control puede resultar útil cuando se desea medir el tiempo de subida de una señal.

5.4.2 Acoplamiento de la entrada

El acoplamiento se refiere al método utilizado para conectar una señal eléctrica de un circuito a otro. En este caso, el acoplamiento de entrada es la conexión del circuito bajo prueba al osciloscopio. El acoplamiento se puede configurar como CC (o DC), CA (o AC) o a tierra (GND) (control 11 para el canal 1 y 12 para el canal 2). El acoplamiento de CC muestra la totalidad de la señal de entrada. El acoplamiento de CA bloquea la componente de CC de la señal para que se pueda centrar la forma de onda sobre cero voltios. La figura 13 ilustra esta diferencia. La configuración del acoplamiento de CA es útil cuando la totalidad de la señal (corriente alterna más corriente continua) es demasiado grande para la disposición del control de volts/div.

El acoplamiento a tierra (GND) desconecta la señal de entrada del sistema vertical, lo cual permite ver dónde se encuentra la línea de cero voltios sobre la pantalla. Con un acoplamiento de entrada conectado a tierra y el modo de disparo en automático (control 27), se puede observar una línea horizontal en la pantalla que representa los cero voltios. El cambio de CC a conexión a tierra y viceversa, es muy útil para medir los niveles de voltaje de una señal con respecto a tierra.

Acoplamiento de CC de una onda sinusoidal de 1 V_{p-p} con un componente de 2 V CC



Acoplamiento de CA de la misma señal

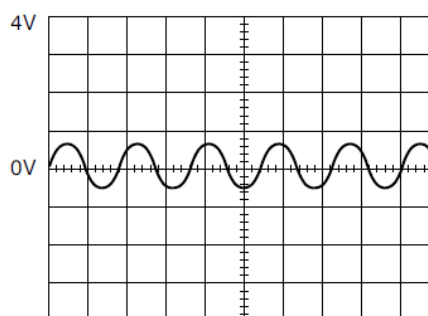


Figura 13.- Acoplamiento de entrada CC y CA.

5.4.3 Límite de ancho de banda

En general, los osciloscopios que superan los 20MHz de ancho de banda disponen de un circuito que limita su ancho de banda. Al limitar el ancho de banda, se reduce el ruido que algunas veces aparece en la forma de onda presentada, lo cual resulta en una presentación de la señal más nítida. Hay que tener en cuenta que, a la par que se reduce el ruido, la limitación del ancho de banda puede también reducir o eliminar el contenido de altas frecuencias de la señal.

5.4.4 Inversión de canal

La mayoría de los osciloscopios tienen una función de inversión que permite visualizar una señal "al revés". Es decir, con la tensión baja en la parte superior de la pantalla y la alta en la parte inferior.



5.4.5 Modos de presentación alternado y troceado (chopeado)

En los osciloscopios analógicos, los canales múltiples se presentan utilizando el modo alternado o el troceado (muchos osciloscopios digitales pueden presentar canales múltiples simultáneamente sin necesidad de ninguno de estos modos).

El modo alternado presenta cada canal alternadamente. El osciloscopio completa un barrido sobre el canal 1, después un barrido sobre el canal 2, después otro barrido sobre el canal 1, y así sucesivamente. Utilice este modo con señales de media a alta velocidad, cuando la escala de TIME/DIV (control 22) esté configurada a 0,5 ms o más rápida (menos tiempo).

El modo troceado hace que el osciloscopio presente pequeñas partes de cada señal, alternando constantemente de una a otra. La velocidad de alternancia es demasiado rápida como para poder verla, por lo que la forma de onda parecerá completa. Típicamente, este modo se utiliza con señales lentas, que requieren velocidades de barrido de 1 ms por división o inferiores. La figura 14 muestra la diferencia entre los dos modos. A menudo, es útil visualizar la señal en ambos modos, para asegurar que se obtiene la mejor presentación de la misma.

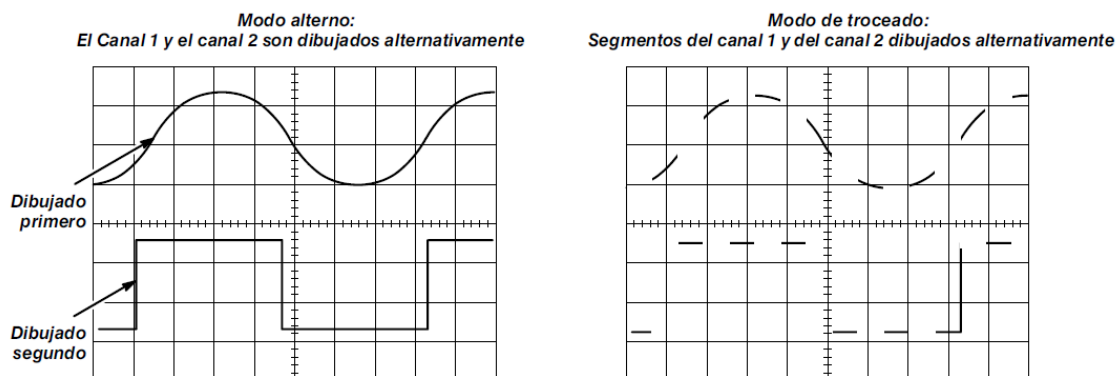


Figura 14.- Modos de visualización de canal múltiple.

5.4.6 Operaciones matemáticas

El osciloscopio puede también realizar operaciones que permiten sumar dos formas de onda, creando así una nueva forma de onda. Los osciloscopios analógicos combinan las señales, mientras que los osciloscopios digitales crean una nueva forma de onda matemáticamente.

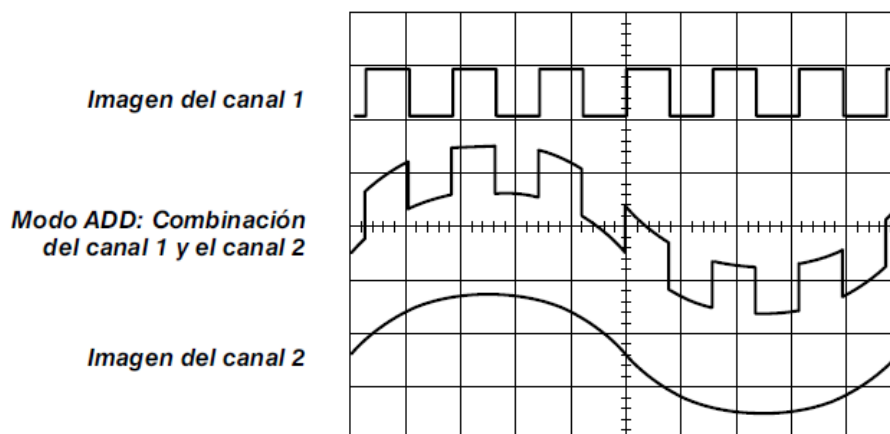


Figura 15.- Suma de canales.



Otra operación matemática es la resta de formas de onda. En osciloscopios analógicos, se puede restar utilizando la función inversora de canal en una señal y luego utilizando la operación de suma. Los osciloscopios digitales suelen disponer típicamente de una operación de resta. La figura 15 ilustra una tercera forma de onda creada sumando dos señales diferentes. Utilizando la potencia de los procesadores internos, los osciloscopios digitales ofrecen muchas operaciones matemáticas avanzadas: multiplicación, división, integración, Transformada Rápida de Fourier (FFT), etc.

5.5 CONTROLES HORIZONTALES

El sistema horizontal de un osciloscopio está estrechamente relacionado con la adquisición de una señal de entrada. Los controles horizontales se utilizan para situar y definir horizontalmente la escala de la forma de onda.

5.5.1 Posición y segundos por división

El control de posición horizontal (HORIZONTAL POSITION, 26) mueve la forma de onda de izquierda a derecha para colocarla exactamente donde se desee en la pantalla.

La configuración de segundos por división (normalmente escrito como TIME/DIV, 22) permite seleccionar la velocidad a la que se traza la forma de onda en la pantalla (también conocida como configuración de la base de tiempos o velocidad de barrido). Esta configuración es un factor de escala. Si la configuración es 1 ms, cada división horizontal representa 1 ms y la totalidad del ancho de la pantalla representará 10 ms, o diez divisiones. El cambio de la configuración time/div permite ver intervalos de tiempo más largos o más cortos de la señal de entrada.

Al igual que la escala vertical de volts/div, la escala horizontal de time/div puede tener una escala de tiempo variable (control 25), permitiendo ajustar la escala de tiempo horizontal entre los valores discretos de la configuración. Para la correcta medición de una señal se debe encontrar en la posición CAL (control 23).

5.5.2 Selección de la base de tiempo

El osciloscopio tiene una base de tiempos, normalmente conocida como la base de tiempos principal. Muchos osciloscopios tienen también lo que se denomina base de tiempos retardada, con la que se puede generar un segundo barrido de un retardo predeterminado a partir del barrido de base de tiempo principal. La utilización del barrido de la base de tiempos retardada permite ver los eventos más claramente o, incluso, ver eventos que sería imposible ver solamente con el barrido de base de tiempos principal.

La base de tiempos retardada requiere la configuración del retardo de tiempo y la posible utilización de modos de disparo retardado, así como otras configuraciones que no se describen en este apunte.

5.5.3 Zoom o amplificación

El osciloscopio puede tener configuraciones especiales de magnificación (control 21, X1 o X10MAG) que permiten mostrar en pantalla una ampliación de una sección de la forma de onda. La operación en un osciloscopio de memoria digital (DSO) se realiza con los datos digitalizados y almacenados.

5.5.4 Modo XY

La mayoría de los osciloscopios analógicos tienen un modo XY (control 22, en la posición más a la derecha) que les permite mostrar una señal de entrada, en vez de la base de tiempos,



en el eje horizontal. Este modo de operación abre un área totalmente nueva de técnicas de medida de desplazamiento de fase (figuras de Lissajous), que se explican más adelante.

5.6 CONTROLES DE DISPARO

La función de disparo de un osciloscopio sincroniza el barrido horizontal en el punto correcto de la señal, función esencial para una clara caracterización de la señal. Los controles de disparo permiten estabilizar las formas de onda repetitivas y capturar formas de onda de ocurrencia única.

El disparo hace que las formas de onda repetitivas aparezcan inmóviles en la pantalla del osciloscopio, mostrando repetidamente la misma sección de la señal de entrada. No es difícil imaginar la confusión que se produciría si cada barrido empezara en un punto diferente de la señal, como se ilustra en la figura 16.

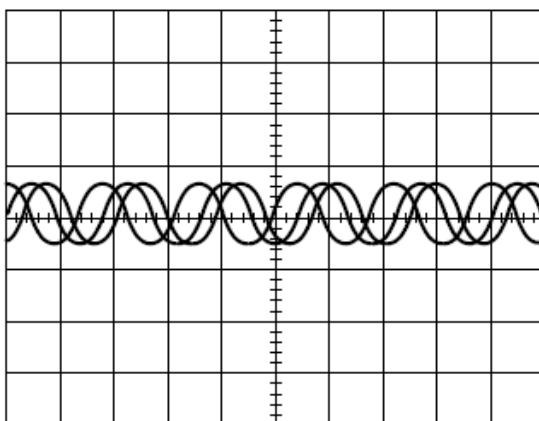


Figura 16.- Presentación no disparada.

5.6.1 Nivel de disparo y pendiente

Los controles de nivel (control 30) y pendiente de disparo (control 33) proporcionan la definición básica del punto de disparo y determinan cómo se presentará una forma de onda, según se ilustra en la figura 17.

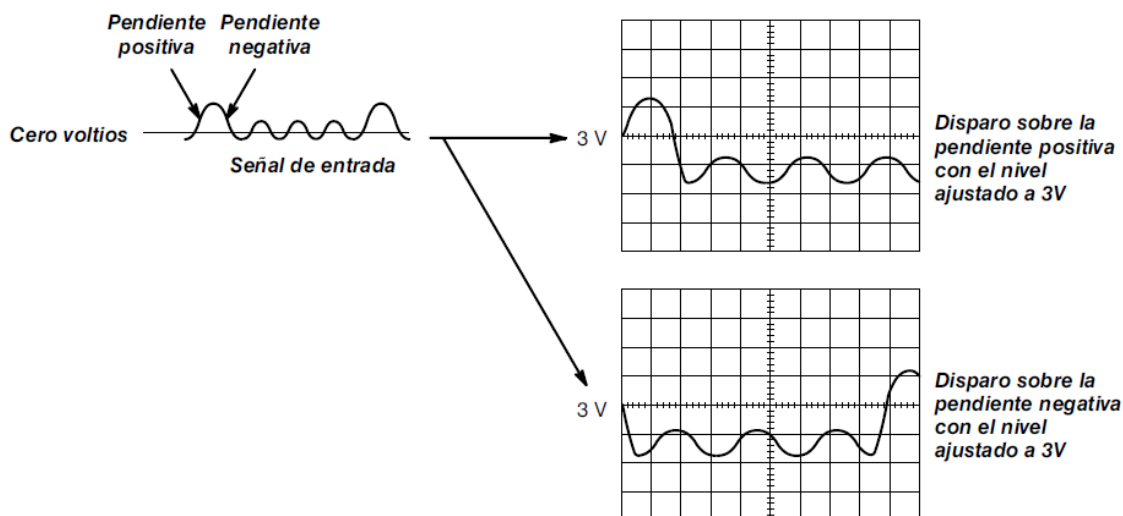


Figura 17.- Disparos sobre pendiente positiva y negativa.



El circuito de disparo actúa como un comparador. Se debe seleccionar la pendiente y el nivel de voltaje en una entrada del comparador. Cuando la señal de disparo en la otra entrada del comparador iguala los parámetros seleccionados, el osciloscopio genera un disparo.

- El control de la pendiente determina si el punto de disparo está en el flanco de subida o en el de bajada. Un flanco de subida es una pendiente positiva, y un flanco de bajada es una pendiente negativa.
- El control del nivel determina en qué punto del flanco ocurre el punto de disparo.

5.6.2 Fuentes de disparo

El osciloscopio no necesariamente tiene que dispararse activado por la señal que se está mostrando. Varias fuentes pueden disparar el barrido (TRIGGER SOURCE control 28 y 32):

- Cualquier canal de entrada (control 28 en INT y control 32 en CH1 o CH2).
- Una fuente externa distinta de la señal aplicada a un canal de entrada (control 28 en la posición más a la derecha y la señal de disparo se introduce por el conector 31).
- La señal de alimentación (control 28 en LINE).
- Una señal definida internamente por el osciloscopio a partir de uno o más canales de entrada (control 28 en INT y control 32 en VERT).

La mayoría de las veces se podrá dejar el osciloscopio configurado para disparar con el canal mostrado. Algunos osciloscopios proporcionan una salida de disparo para poder enviar la señal de disparo a otro instrumento.

El osciloscopio puede utilizar una fuente de disparo alternativa, esté o no presentada, por lo que se deberá cuidar de no disparar inadvertidamente en el canal 1 mientras se está mostrando el canal 2, por ejemplo.

5.6.3 Modos de disparo

El modo de disparo determina si el osciloscopio traza o no una forma de onda basándose en una condición de señal. Los modos habituales de disparo incluyen el normal y el automático (TRIGGER MODE, control 27).

En el modo normal, el osciloscopio solamente genera un barrido si la señal de entrada alcanza el punto de disparo establecido; de lo contrario, no aparecerá la traza en la pantalla (en un osciloscopio analógico) o la última forma de onda adquirida quedará congelada (en un osciloscopio digital). El modo normal puede desorientar al usuario, puesto que en un principio no se verá la señal si el control de nivel no está correctamente ajustado.

El modo automático hace que el osciloscopio genere un barrido, incluso sin que haya disparo. Si no hay una señal presente, un temporizador en el osciloscopio disparará el barrido. Esto asegura que la traza no desaparezca de la pantalla si la señal no genera un disparo.

En la práctica, probablemente se utilizarán los dos modos: el modo normal, porque permite ver exactamente la señal de interés, incluso cuando el disparo ocurre a una velocidad lenta, y el modo automático, porque requiere menos ajustes.

Muchos osciloscopios incluyen también modos especiales para barridos individuales, disparo en señales de vídeo, o configuración automática del nivel de disparo.



5.6.4 Acoplamiento del disparo

Así como se puede seleccionar el acoplamiento de CA o CC para el sistema vertical, en algunos osciloscopios también se puede seleccionar el tipo de acoplamiento para la señal de disparo.

Además del acoplamiento de CA y CC, el osciloscopio también puede disponer de acoplamientos de disparo de rechazo a la alta frecuencia, rechazo a la baja frecuencia, y rechazo al ruido. Estas configuraciones especiales son útiles para eliminar el ruido en la señal de disparo y evitar así falsos disparos.

5.6.5 Retención del disparo ("holdoff")

A veces se requiere una gran habilidad para conseguir que el osciloscopio dispare en la parte deseada de una señal. Muchos osciloscopios tienen características especiales para facilitar esta tarea.

La retención del disparo es un período de tiempo ajustable después de un disparo válido durante el cual el osciloscopio no puede disparar. Esta característica es útil cuando se está disparando sobre formas de onda complejas, de manera que el osciloscopio solamente pueda disparar sobre un punto de disparo válido. La figura 18 muestra cómo la utilización de la retención del disparo ayuda a crear una presentación útil.

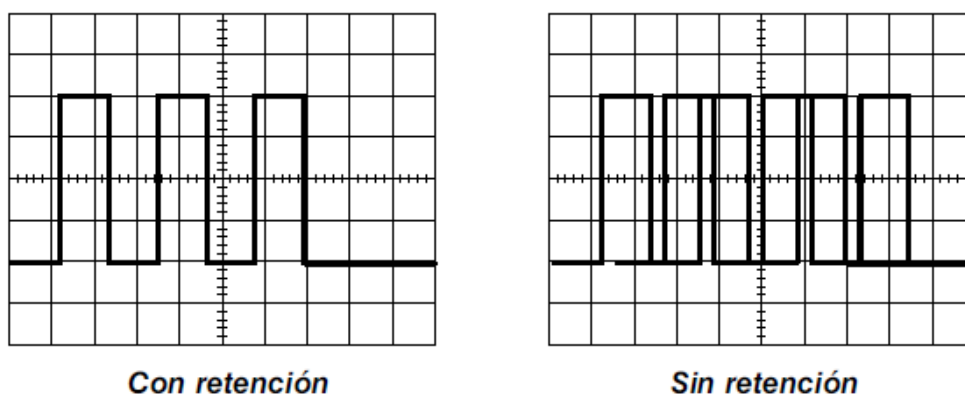


Figura 18.- Retención de disparo.

6. TÉCNICAS DE MEDICIÓN

En este apartado se explican las técnicas de medida básicas con un osciloscopio. Las dos mediciones más básicas que se pueden realizar con un osciloscopio son la de tensión y tiempo.

Esta sección describe como realizar medidas visualmente en la pantalla del osciloscopio. Los osciloscopios digitales poseen un software interno que permite realizar las medidas de forma automática. Sin embargo, si aprendemos a realizar medidas de forma manual, estaremos también capacitados para chequear las medidas automáticas que realiza un osciloscopio digital.

6.1 LA PANTALLA

Si observamos la pantalla de un osciloscopio veremos una retícula. Cada línea vertical y horizontal constituye una división principal. La retícula se presenta usualmente en un patrón de 8 por 10 divisiones. La rotulación en los controles del osciloscopio (p. ej., voltios/div y time/div) siempre se refiere a divisiones principales. Las acotaciones en las líneas verticales y



horizontales de la retícula, como se indica en la figura 19 (vea página siguiente), se denominan divisiones menores.

Muchos osciloscopios muestran en la pantalla los voltios que representan cada división vertical y los segundos que representa cada división horizontal. Normalmente también tienen marcas para 0%, 10%, 90% y 100% en la cuadrícula para ayudar a realizar mediciones del tiempo de subida de una señal.

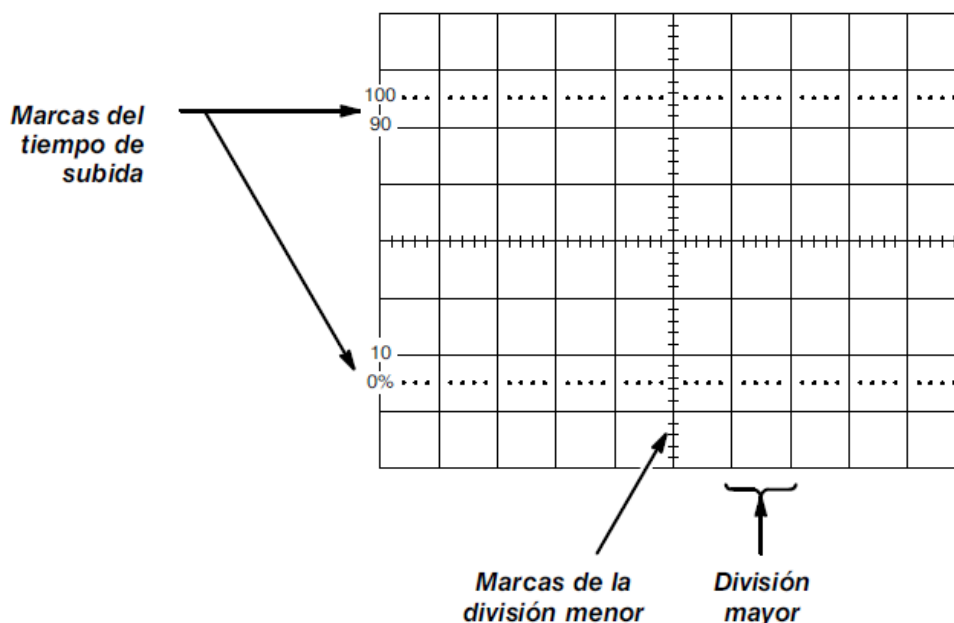


Figura 19.- Pantalla de un osciloscopio.

6.2 MEDICIÓN DE TENSIÓN

El voltaje es la cantidad de potencial eléctrico, expresada en voltios, entre dos puntos de un circuito. Normalmente, uno de estos puntos es una conexión a tierra (cero voltios), pero no siempre. Los voltajes también pueden medirse pico a pico desde el punto máximo de una señal hasta su punto mínimo. Se debe tener cuidado al especificar qué voltaje se va a medir.

Básicamente, el osciloscopio es un dispositivo de medida de voltaje. Una vez que se ha medido un voltaje, algún cálculo más es suficiente para medir otras cantidades. Por ejemplo, la ley de Ohm dice que el voltaje entre dos puntos de un circuito es igual a la corriente multiplicada por la resistencia. A partir de cualquiera de estas dos cantidades, se puede calcular la tercera.

Otra fórmula útil es la Ley de la potencia: la potencia de una señal de CC es igual al voltaje multiplicado por la corriente. Para señales de CA, los cálculos son más complicados, pero lo importante aquí es que la medida del voltaje es el primer paso que conduce al cálculo de otros parámetros.

La figura 20 muestra el voltaje de pico (V_p) y el voltaje pico a pico (V_{p-p}), el cual suele ser el doble de V_p . La tensión RMS (tensión eficaz, V_{RMS}) se utiliza para calcular la potencia de una señal de CA.

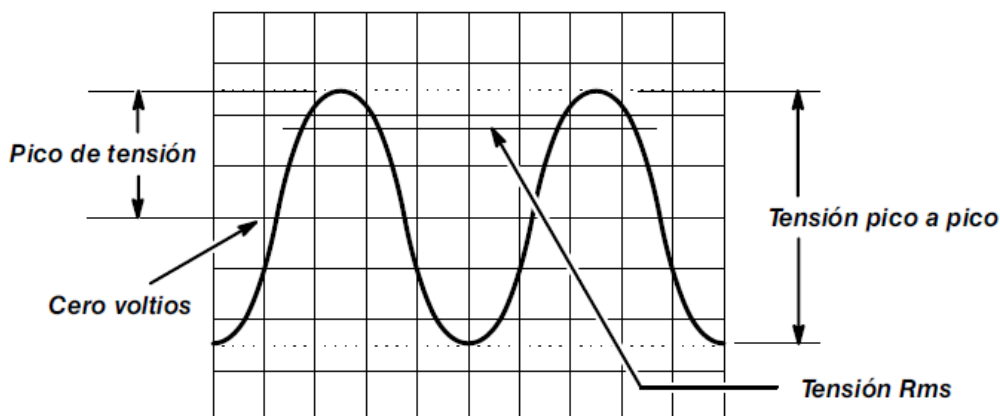


Figura 20.- Tensión de pico y tensión de pico a pico.

El método más básico para realizar medidas de voltaje es contar el número de divisiones que ocupa una forma de onda en la escala vertical del osciloscopio. Ajustando la señal para cubrir la mayor parte de la pantalla verticalmente, permitirá obtener mejores medidas de tensión (vea la figura 21). Cuanta más área de pantalla se utilice, más precisa será la lectura en la pantalla.

Muchos osciloscopios poseen líneas de cursores en la pantalla que permiten realizar medidas automáticas de la forma de onda sin necesidad de contar las divisiones de la retícula. Un cursor es simplemente una línea que se puede desplazar de un lado a otro de la pantalla. Las dos líneas de cursor horizontales se pueden desplazar hacia arriba y hacia abajo para fijar la amplitud de una forma de onda en medidas de voltaje, y las dos líneas (cursores) verticales se pueden desplazar a derecha e izquierda para medir tiempos. Una lectura en pantalla indicará el voltaje o el tiempo para cada una de sus posiciones.

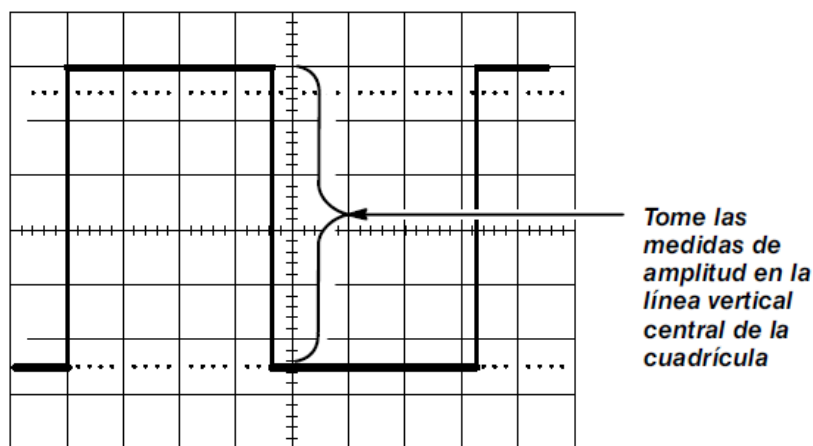


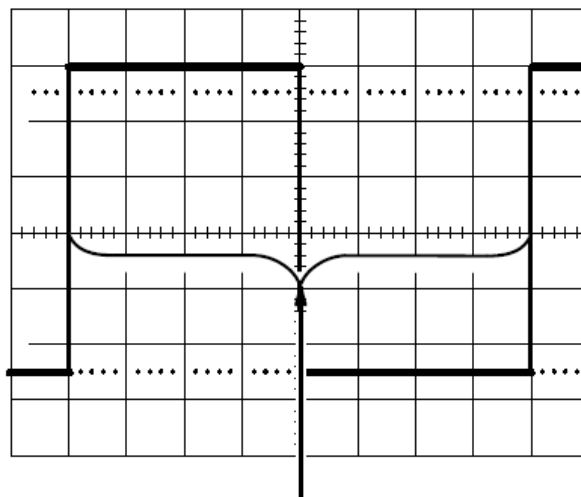
Figura 21.- Tensión medida en la línea vertical central de la cuadrícula.

6.3 MEDICIÓN DE TIEMPO Y FRECUENCIA

Las medidas de tiempo se pueden realizar utilizando la escala horizontal del osciloscopio. Las medidas de tiempo incluyen la medida del período y del ancho de pulso. La frecuencia es la recíproca del período; por lo tanto, una vez que se conoce el período, la frecuencia será 1 dividido por el período. Al igual que en las medidas de voltaje, las medidas de tiempo son más



precisas cuando se ajusta la porción de la señal que se va a medir de forma que cubra una amplia zona de la pantalla en forma horizontal, como se ilustra en la figura 22.



Tome las medidas de tiempo en la línea horizontal central de la cuadrícula

Figura 22.- Tiempo medido en la línea horizontal central de la cuadrícula.

6.4 MEDICIÓN DE PULSO Y TIEMPO DE SUBIDA

En muchas aplicaciones, los detalles de la forma de los pulsos son importantes. Los pulsos pueden experimentar distorsiones y hacer que un circuito funcione incorrectamente, y la temporización en un tren de pulsos es, con frecuencia, muy significativa.

Las medidas habituales de pulsos son el ancho del pulso y el tiempo de subida. El tiempo de subida es la cantidad de tiempo que tarda un pulso en cambiar desde su voltaje bajo al alto. Por convención, el tiempo de subida se mide desde el 10% al 90% del voltaje total del pulso. Esto elimina cualquier irregularidad en las esquinas de transición del pulso. El ancho de pulso es la cantidad de tiempo que el pulso tarda desde una transición de voltaje bajo a alto hasta una transición de voltaje alto a bajo, o viceversa. Por convención, el ancho del pulso se mide al 50% del voltaje total. La figura 23 ilustra estos puntos de medida.

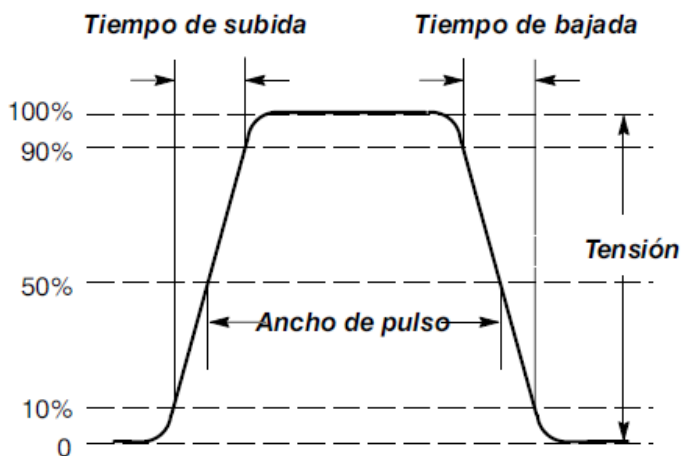


Figura 23.- Puntos de medición del tiempo de subida y del ancho del pulso.



6.4 MEDIDAS DE DESPLAZAMIENTO DE FASE

Un método para medir el desplazamiento de fase (la diferencia en tiempo entre dos señales periódicas que, por lo demás, son idénticas) es utilizar el modo XY. Esta técnica de medida implica introducir una señal en el sistema vertical de la forma habitual, y la segunda señal en el sistema horizontal. Esto se denomina medida XY, porque tanto el eje X como el eje Y del osciloscopio representan sendos voltajes. La forma de onda resultante de esta configuración se denomina figura de Lissajous (en referencia al físico francés Jules Antoine Lissajous). De la forma de la figura de Lissajous se puede determinar la diferencia de fase entre las dos señales. También se puede determinar la relación de frecuencia. La figura 24 muestra figuras de Lissajous para varias relaciones de frecuencia y diferencias de fase.

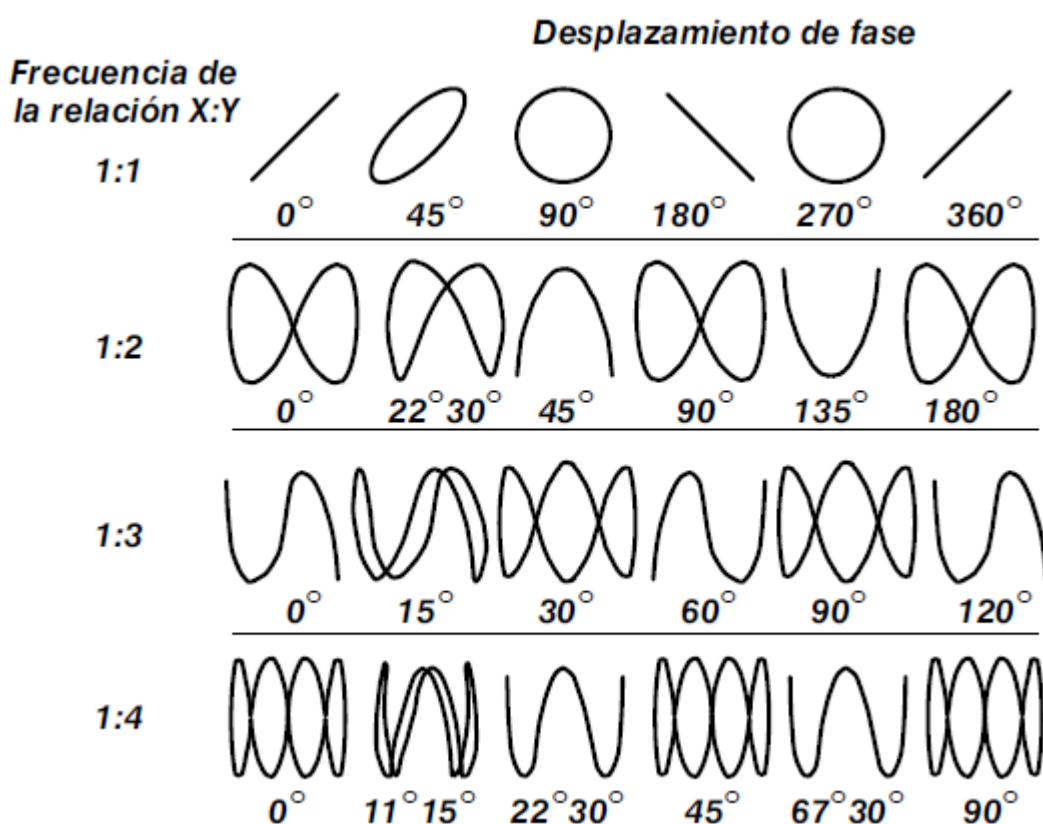


Figura 24.- Figuras de Lissajous.