

# UNA APROXIMACION AL MUNDO DE LAS SONDAS

Por Ignacio Usunáriz  
Ingeniero de Aplicaciones  
Tektronix Española, S.A.

## INTRODUCCION



El componente más crítico de un sistema de medida basado en un osciloscopio es su propia sonda, pues ésta interactúa directamente con la señal que se pretende capturar. De nada sirve el osciloscopio más potente y preciso si la sonda empleada para capturar la señal no se adecúa al mismo. En este sentido, la calidad de la medida siempre estará limitada por la calidad de la sonda, y la elección correcta de la misma deberá considerar no sólo las especificaciones del osciloscopio sino también las de la propia sonda, las del circuito bajo prueba y las características de la señal a medir.

En esta nota de aplicación se presentan diferentes tipos de sondas, sus aplicaciones generales y especificaciones más importantes. Se incluye igualmente los circuitos equivalentes simplificados de cada tipo de sonda, ya que es la mejor forma de comprender el fundamento de la misma, así como algunos conceptos básicos que implican su manejo. A propósito, ¿Sabe usted en que consiste y a qué afecta la compensación de una sonda pasiva de tensión....?

# 1. SONDAS PASIVAS DE TENSION

La primera aproximación a una sonda pasiva de tensión podría ser dos simples cables eléctricos: Uno aplicado desde el punto a medir del circuito bajo prueba al canal de entrada del osciloscopio, y el otro que uniera eléctricamente la masa de dicho circuito (referencia de 0V) con la masa del osciloscopio.

Este método de medida se emplea efectivamente en osciloscopios de bajo ancho de banda y equipos de medida para señales de baja frecuencia (como son los multímetros p.e.). Sin embargo, no es una aproximación correcta cuando se trata de hacer al sistema de medida lo más inmune posible al entorno electromagnético que lo rodea (dos cables eléctricos son muy susceptibles de recoger interferencias electromagnéticas externas), o cuando se trata de minimizar la carga del sistema de medida sobre el circuito bajo prueba (un sistema de medida, por definición debe afectar o cargar lo mínimo posible a la fuente de señal a medir, y de nuevo, dos simples cables eléctricos no son, en este sentido, la mejor solución). Por otro lado no hay que olvidar la falta de seguridad y protección al

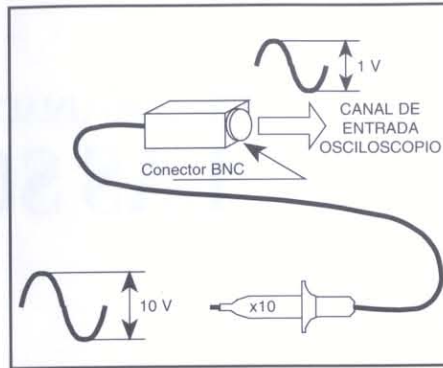


Figura 1. Sonda de tensión atenuadora x10

usuario que este método puede suponer cuando se pretenden medir señales de alta tensión.

Las sondas pasivas de tensión no son, de hecho, dos simples cables eléctricos. Como su propio nombre indica, se fabrican exclusivamente con componentes pasivos (resistencias, bobinas y condensadores). Son las sondas de tensión más comunes por ser económi-

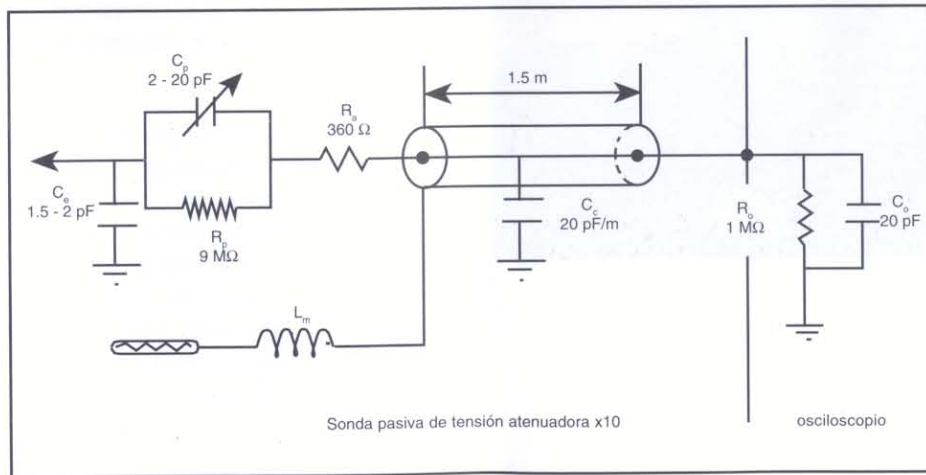


Figura 2. Circuito equivalente del sistema sonda-osciloscopio.

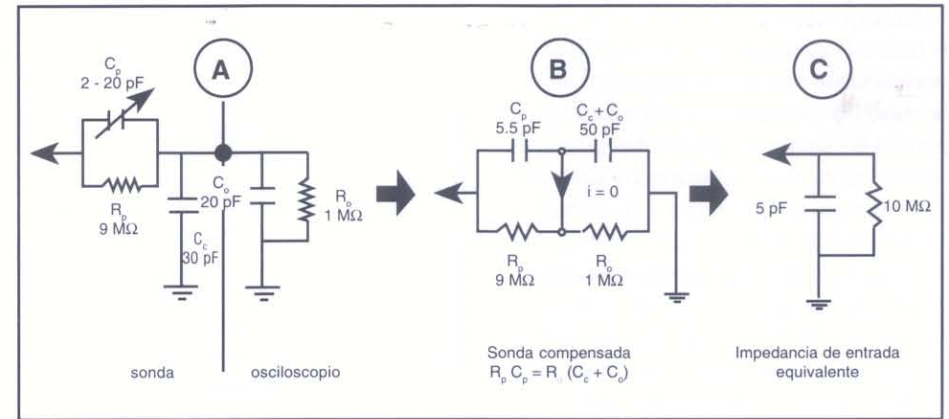


Figura 3. Simplificación del circuito de la figura 2 con sonda compensada.

cas, fáciles de usar y tener un amplio rango dinámico. Además, son muy robustas, y debido a su sencillez, su mantenimiento es mínimo.

La primera especificación de una sonda pasiva de tensión (y en general de cualquier sonda de tensión) es su **factor de atenuación**. El factor de atenuación de una sonda de tensión determina la proporción que hay entre las amplitudes de las señales de entrada y salida

de la misma cuando la sonda se conecta al osciloscopio (ver figura 1). En este sentido son típicos los factores de atenuación x1, x10, x100 y x1000.

Cuanto más elevado es el factor de atenuación de una sonda, menor es la sensibilidad vertical del sistema de medida sonda-osciloscopio (disminuye en la proporción dada por dicho factor), aunque por otro lado mayor es la tensión máxima que se puede medir (se

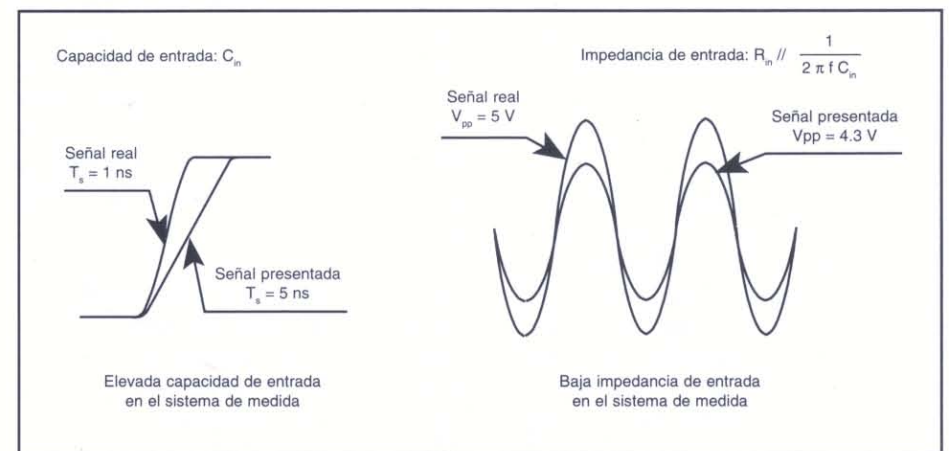


Figura 4. Efectos de la capacidad e impedancia de entrada.

multiplica por el factor de atenuación). Sin embargo, la razón más importante por la que generalmente se emplean sondas con factor de atenuación distinto de la unidad (típicamente x10) es la de reducir la carga eléctrica del sistema de medida sobre el circuito a medir (evitando así, en la medida de lo posible, que el funcionamiento de dicho circuito se vea afectado por la presencia de un elemento extraño al mismo como es el sistema de medida). En efecto, tal y como se aprecia en la figura 2, la carga que ofrece un osciloscopio al circuito bajo prueba se puede aproximar por una resistencia de  $1\text{ M}\Omega$  en paralelo con un condensador de  $20\text{ pF}$ . Cuando se conecta la sonda pasiva x10 al osciloscopio, se forma un divisor de tensión resistivo-capacitivo que, despreciando el efecto de la resistencia de amortiguamiento a las reflexiones  $R_a$ , la capacidad de contacto en punta de sonda  $C_e$  (que depende de las condiciones ambientales) y la inductancia del terminal de masa  $L_m$ , se puede aproximar al circuito presentado en la figura 3A. El condensador  $C_p$  es variable, ajustándose externamente con un pequeño destornillador, para poder conseguir que:

$$R_p C_p = R_o [C_c + C_o] \quad (\text{Sonda compensada})$$

La compensación de la sonda es necesaria si se quiere conseguir una respuesta plana del sistema sonda-osciloscopio a lo largo de todo el ancho de banda de este último. En caso contrario, las frecuencias elevadas se verán bien amplificadas (sonda sobrecompensada) o bien atenuadas (sonda subcompensada), originando en ambos casos una distorsión en la señal presente en pantalla del osciloscopio. Cuando la sonda está compensada, el puente de impedancias de la figura 3B está equilibrado, y en estas condiciones puede ser simplificado al circuito equivalente de la figura 3C. Como se puede apreciar, la carga del sistema sonda-osciloscopio sobre el circuito bajo prueba es mucho menor que la carga propia del osciloscopio ( $10\text{ M}\Omega$  y  $5\text{ pF}$  frente a  $1\text{ M}\Omega$  y  $20\text{ pF}$ ), lo que redunda además en una mayor precisión del sistema de medida. En efecto, las capacidades

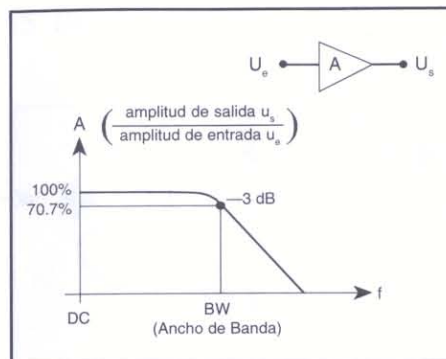


Figura 5. Curva de respuesta en frecuencia.

elevadas de entrada en los equipos de medida provocan que los tiempos de subida medidos sean más lentos que los reales, mientras que impedancias de entrada bajas (paralelo de una carga resistiva con una carga capacitiva) originan amplitudes medidas inferiores a las verdaderas (ver figura 4).

El **ancho de banda** del sistema Sonda-Osciloscopio determina la frecuencia máxima de una señal senoidal que dicho sistema puede adquirir sin reducir la amplitud por debajo del  $70.7\%$  de su valor real (punto de  $-3\text{ dB}$  de la curva de respuesta en frecuencia de la figura 5). Se puede demostrar que dicho ancho de banda es siempre inferior a los anchos de banda de la sonda y osciloscopio por separado. Así, por ejemplo, un osciloscopio de  $500\text{ MHz}$  junto con una sonda de  $500\text{ MHz}$  proporcionan un ancho de banda conjunto de  $350\text{ MHz}$ . Por ello, para mantener el ancho de banda del osciloscopio en la punta de la sonda, es necesario que el ancho de banda de ésta sean muy superior al de aquel.

En este sentido, y para evitar degradaciones "inesperadas" de ancho de banda, Tektronix especifica en la mayoría de sus sondas el ancho de banda conjunto del sistema sonda-osciloscopio para su osciloscopio recomendado. Así, una sonda de Tektronix de  $100\text{ MHz}$  conectada a su osciloscopio de  $100\text{ MHz}$ , proporciona un **ancho**

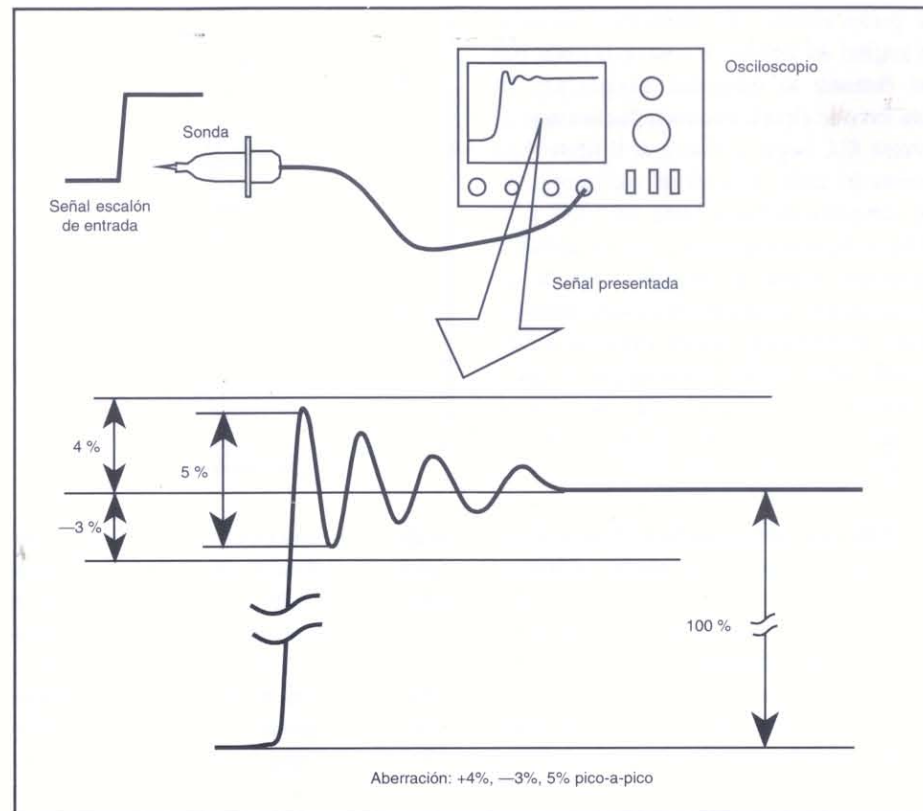


Figura 6. Aberración típica de una sonda de tensión atenuadora x10.

**de banda en punta de sonda** del sistema conjunto de  $100\text{ MHz}$ .

Otra especificación interesante en una sonda de tensión es el **porcentaje de aberración**, que no es más que un margen para las sobreoscilaciones que se generan en la respuesta del sistema sonda-osciloscopio cuando a la entrada de éste se aplica una señal con forma de escalón (ver figura 6).

Son típicas aberraciones de  $+4\%$ ,  $-3\%$  (límite superior e inferior para las sobreoscilaciones, respectivamente) y  $5\%$  pico a pico (tensión pico a pico de la sobreoscilación máxima).

Las aberraciones se originan al resonar el circuito RLC de entrada del sistema sonda-osciloscopio. En efecto, tal y como se aprecia en la figura 2, el terminal de masa de la sonda tiene asociada una inductancia característica,  $L_m$ , que junto con la capacidad  $C_{in}$ , y la resistencia  $R_{in}$  del circuito equivalente sonda-osciloscopio (figura 3C) forma el circuito resonante de la figura 7.

Cuando este circuito se excita con una señal que contiene un armónico con su frecuencia de resonancia, sobreoscila a tal frecuencia, generándose las aberraciones.

Se pueden eliminar estas aberraciones reduciendo la longitud del terminal de masa de la sonda, para así disminuir su inductancia asociada  $L_m$ . De esta forma se eleva la frecuencia de resonancia del circuito RLC (según la relación de la figura 7) por encima del ancho de banda del osciloscopio, que se comporta entonces como un filtro a las sobreoscilaciones resonantes. Esta es también la razón por la que en las aplicaciones de alta frecuencia con osciloscopios de elevados anchos de banda, sea conveniente emplear terminales de masa lo más cortos posibles para conseguir así que la frecuencia de resonancia del circuito RLC esté por encima de la banda pasante del osciloscopio (ver figura 8).

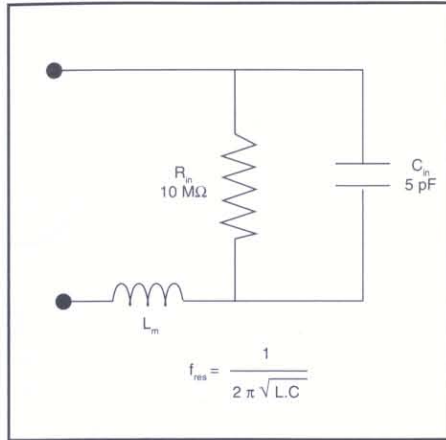


Figura 7. Circuito resonante.

La última característica general a considerar en una sonda pasiva de tensión es la **tensión máxima** que puede soportar sin degradación de sus especificaciones. Esta característica es también conocida con el nombre de **rango dinámico**.

Un valor típico de tensión máxima en las sondas atenuadoras x10 es de 500 V (dc + pico ac). Las

sondas atenuadoras x100 y x1000 se emplean casi siempre en medidas de alta tensión, por lo que se fabrican con materiales dieléctricos especiales capaces de soportar dichas tensiones. Son valores típicos los de 1.5KV para las sondas atenuadoras x100, y 20Kv para las atenuadoras x1000. El circuito equivalente simplificado de una sonda pasiva de tensión atenuadora x100 y x1000 se presenta en la figura 9.

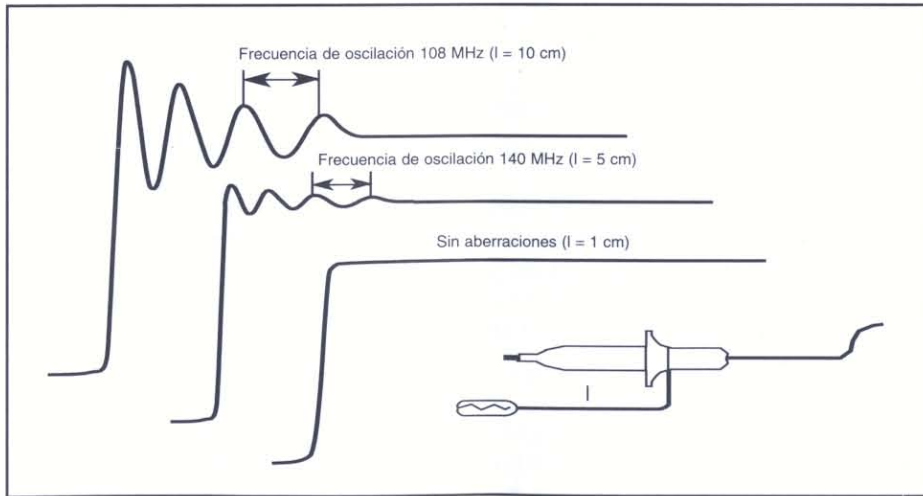


Figura 8. Respuesta a un escalón con diferentes longitudes de terminal de masa.

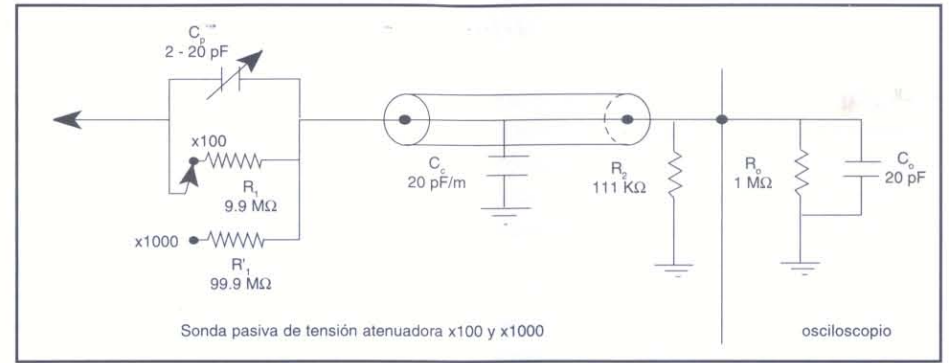


Figura 9. Circuito equivalente para una sonda pasiva atenuadora x100 y x1000.

## 2. SONDAS PASIVAS DE BAJA IMPEDANCIA

Las sondas pasivas de baja impedancia tienen una carga capacitiva muy baja, si bien su carga resistiva es relativamente alta (1pF y 500Ω respectivamente) son valores típicos en una sonda atenuadora x10).

En figura 10 se muestra el circuito equivalente de este tipo de sondas. Como se puede apreciar, se trata de un divisor de tensión x10 para altas frecuencias ya que, según la teoría de líneas de transmisión, lo que la resistencia de 450Ω "ve" mirando hacia el cable, es una resistencia pura de 50Ω, sin componentes capacitivos ni inductivos. No es necesario ninguna

compensación en baja frecuencia ya que el circuito no es un divisor capacitivo.

Las sondas de baja impedancia suelen tener un gran ancho de banda (hasta 9GHz) siendo muy adecuadas para medir tiempos rápidos de subida. Sin embargo dada su baja impedancia, pueden afectar la amplitud de la señal medida, por lo que deben emplearse preferentemente para medir circuitos de impedancia no superior a 50Ω. Por último deben conectarse a osciloscopios con entrada de 50Ω.

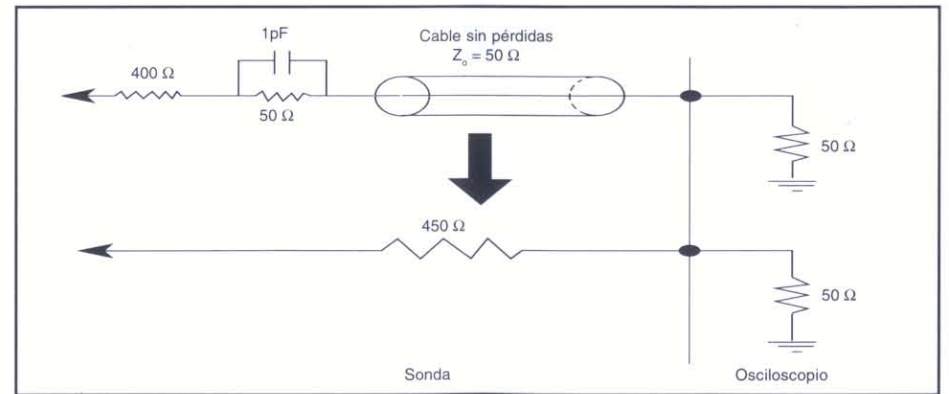


Figura 10. Circuito equivalente de una sonda de baja impedancia x10.

Se pueden eliminar estas aberraciones reduciendo la longitud del terminal de masa de la sonda, para así disminuir su inductancia asociada  $L_m$ . De esta forma se eleva la frecuencia de resonancia del circuito RLC (según la relación de la figura 7) por encima del ancho de banda del osciloscopio, que se comporta entonces como un filtro a las sobreoscilaciones resonantes. Esta es también la razón por la que en las aplicaciones de alta frecuencia con osciloscopios de elevados anchos de banda, sea conveniente emplear terminales de masa lo más cortos posibles para conseguir así que la frecuencia de resonancia del circuito RLC esté por encima de la banda pasante del osciloscopio (ver figura 8).

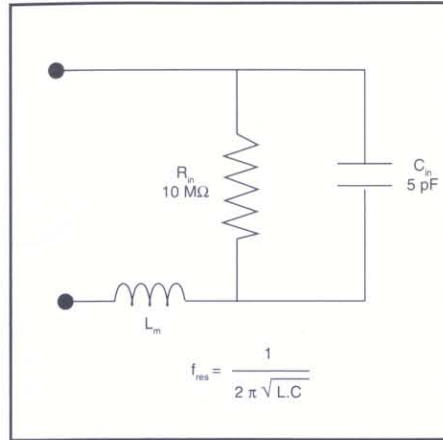


Figura 7. Circuito resonante.

La última característica general a considerar en una sonda pasiva de tensión es la **tensión máxima** que puede soportar sin degradación de sus especificaciones. Esta característica es también conocida con el nombre de **rango dinámico**.

Un valor típico de tensión máxima en las sondas atenuadoras x10 es de 500 V (dc + pico ac). Las

sondas atenuadoras x100 y x1000 se emplean casi siempre en medidas de alta tensión, por lo que se fabrican con materiales dieléctricos especiales capaces de soportar dichas tensiones. Son valores típicos los de 1.5KV para las sondas atenuadoras x100, y 20Kv para las atenuadoras x1000. El circuito equivalente simplificado de una sonda pasiva de tensión atenuadora x100 y x1000 se presenta en la figura 9.

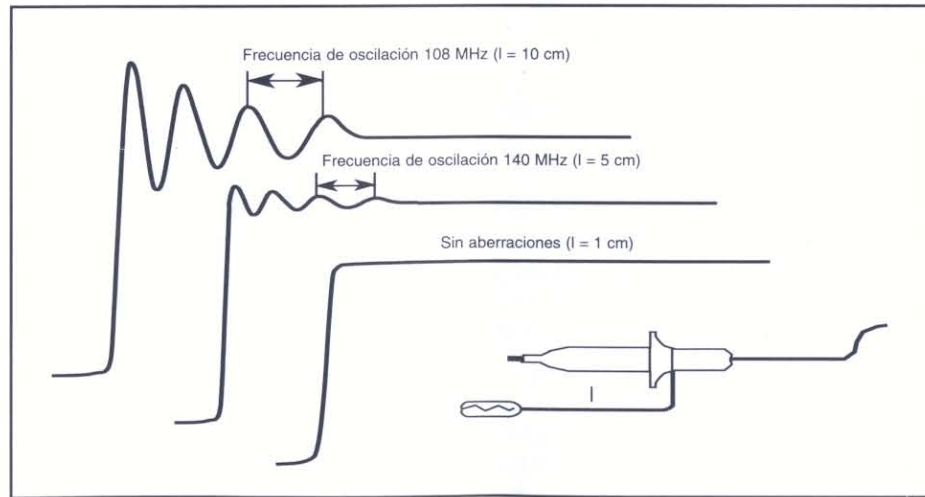


Figura 8. Respuesta a un escalón con diferentes longitudes de terminal de masa.

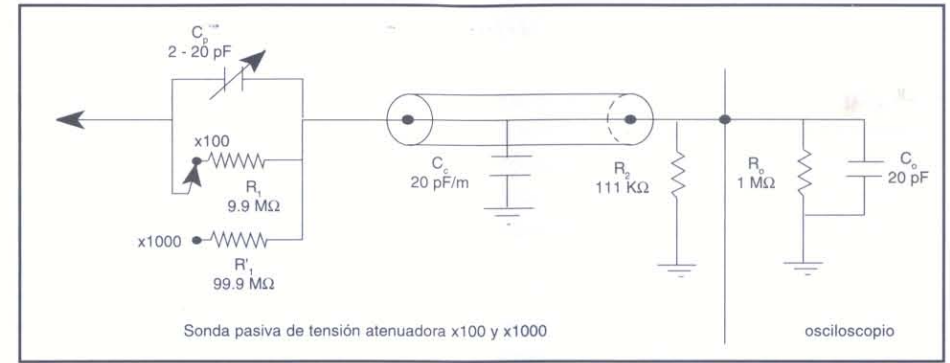


Figura 9. Circuito equivalente para una sonda pasiva atenuadora x100 y x1000.

## 2. SONDAS PASIVAS DE BAJA IMPEDANCIA

Las sondas pasivas de baja impedancia tienen una carga capacitiva muy baja, si bien su carga resistiva es relativamente alta (1pF y 500Ω respectivamente) son valores típicos en una sonda atenuadora x10).

En figura 10 se muestra el circuito equivalente de este tipo de sondas. Como se puede apreciar, se trata de un divisor de tensión x10 para altas frecuencias ya que, según la teoría de líneas de transmisión, lo que la resistencia de 450Ω “ve” mirando hacia el cable, es una resistencia pura de 50Ω, sin componentes capacitivos ni inductivos. No es necesario ninguna

compensación en baja frecuencia ya que el circuito no es un divisor capacitivo.

Las sondas de baja impedancia suelen tener un gran ancho de banda (hasta 9GHz) siendo muy adecuadas para medir tiempos rápidos de subida. Sin embargo dada su baja impedancia, pueden afectar la amplitud de la señal medida, por lo que deben emplearse preferentemente para medir circuitos de impedancia no superior a 50Ω. Por último deben conectarse a osciloscopios con entrada de 50Ω.

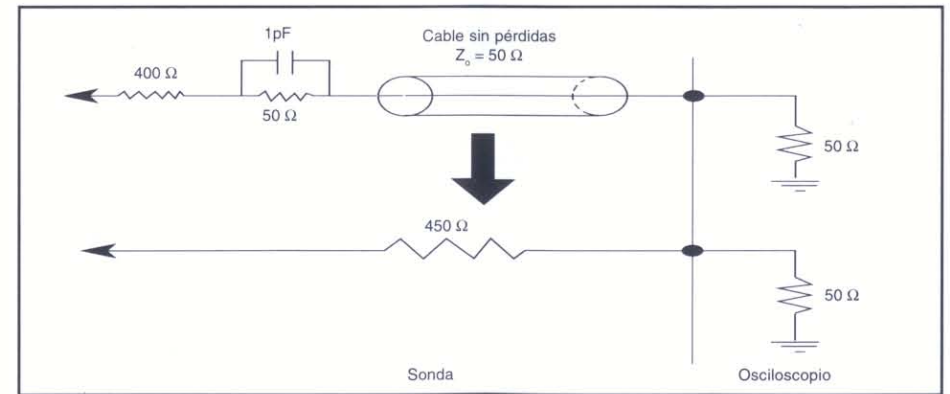


Figura 10. Circuito equivalente de una sonda de baja impedancia x10.

### 3. SONDAS ACTIVAS

Las sondas activas emplean componentes activos (transistores y fuentes de alimentación) tanto en el cuerpo de la sonda como en su caja de terminación. Necesitan una fuente de alimentación para su funcionamiento, que puede ser externa o provenir del propio osciloscopio.

El circuito equivalente de una sonda activa es el que se presenta en la figura 11. La suma de las resistencias R1 y R2 proporciona la carga resistiva de entrada (10MΩ). La carga capacitiva de entrada del sistema sonda-osciloscopio es la suma serie de la capacidad C1 con la capacidad de entrada del transistor FET en configuración seguidor de fuente, y oscila típicamente entre 1 y 3pF.

El conmutador S permite acoplar la sonda a osciloscopios de 1MΩ de impedancia de entrada.

Como se puede apreciar, las sondas activas ofrecen una carga mínima sobre el circuito bajo prueba (10MΩ y 3pF) y además sus anchos de banda suelen ser muy elevados (p.e. 3GHz). Su rango dinámico varía desde +/- 30V y +/- 200V entre modelo y modelo, que es inferior al de las sondas pasivas.

Se trata por lo tanto de sondas de alta precisión, más delicadas que las sondas pasivas de propósito general y por lo general, más caras. Se suelen emplear en osciloscopios con elevados anchos de banda (a partir de 350MHz).

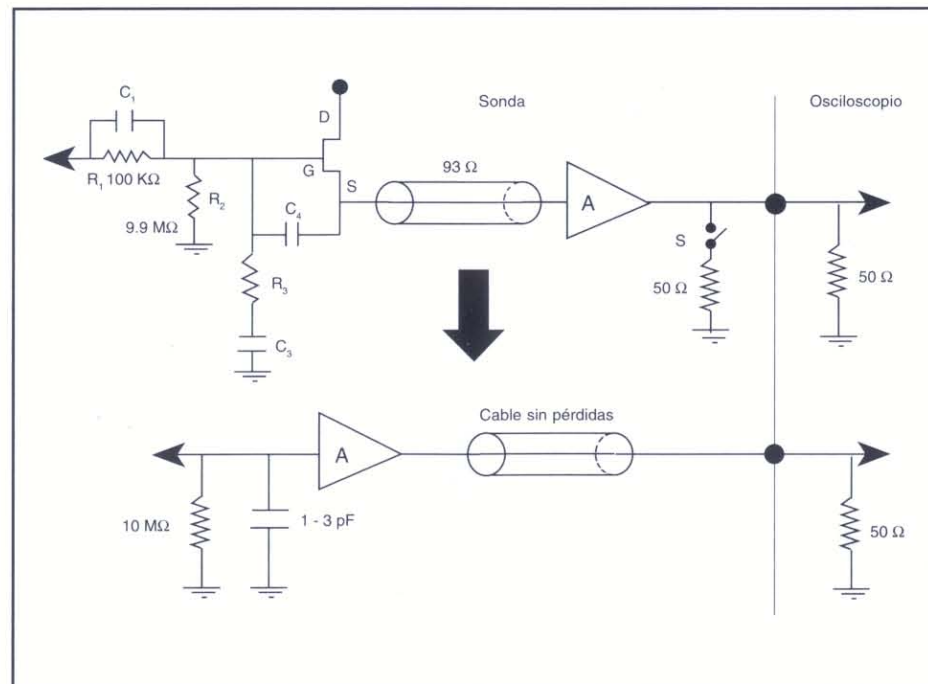


Figura 11. Circuito equivalente de una sonda activa atenuadora x10.

### 4. SONDAS DIFERENCIALES DE TENSION

Las sondas diferenciales de tensión pueden ser pasivas o activas. Las primeras consisten en una pareja de sondas atenuadoras gemelas x10 con prácticamente idénticas capacidades, resistencias y longitudes para minimizar las diferencias de impedancia y retardo de propagación de la señal. Algunas disponen además de un circuito de atenuación ajustable que permite compensar las posibles diferencias entre sondas. Esta precaución de mantener la máxima igualdad en las sondas es esencial si se desea conservar la relación de rechazo en modo común (RRMC) del osciloscopio o amplificador al que se conectan. Por lo demás son en todo iguales a las sondas pasivas de tensión.

Las sondas diferenciales activas están basadas en un amplificador diferencial de componentes extremadamente precisos situado en la propia punta de sonda (ver figura 12). Así, el rechazo en modo común es intrínseco a la sonda (típicamente es de 10000:1) y no depende del equipo al que ésta esté conectada (la RRMC en un osciloscopio de propósito general rara vez supera el valor de 50:1, valor que con dos sondas pasivas diferenciales perfectamente apareadas se conseguiría desplazar sin merma hasta la punta de sonda).

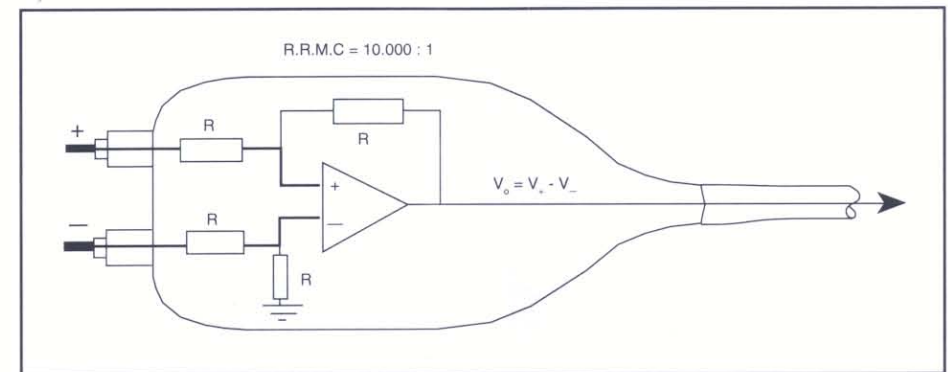


Figura 12. Sonda diferencial activa.

### 5. SONDAS DE CORRIENTE

Las sondas de corriente se emplean para medir intensidades de corriente eléctrica a través de un hilo conductor y, al igual que las sondas de tensión, pueden ser pasivas o activas.

Las sondas pasivas se emplean exclusivamente para medir corrientes alternas. Consisten esencialmente

en un transformador en el que el primario es el propio cable cuya corriente eléctrica se quiere medir, mientras que el secundario es un arrollamiento de un número determinado de vueltas. La sensibilidad de la sonda depende de este número de vueltas y de la precisión de la carga empleada en el circuito del secundario (ver figura 13). Esta sensibilidad se

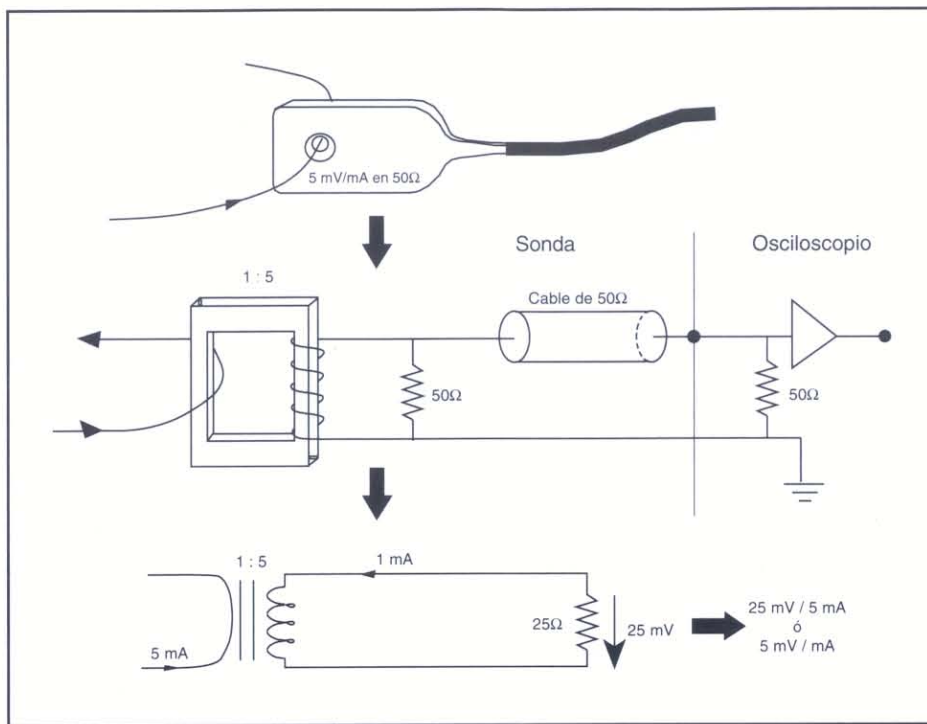


Figura 13. Sonda pasiva de corriente.

específica como tensión generada en el secundario por corriente mínima circulante por el primario (p.e. 5mV/mA).

El resto de especificaciones son similares a las de cualquier dispositivo o instrumento de medida, es decir, ancho de banda (desde decenas de Hz a un GHz), tiempo de subida, impedancia de carga (más conocida como impedancia de inserción), tensión máxima en el circuito a medir, máxima corriente tanto instantánea como continua...

Las sondas activas de corriente se emplean para medir tanto corrientes alternas como continuas. Para ello emplean un transformador de corriente junto con un dispositivo especial llamado de efecto Hall. (ver figura 14).

El Dispositivo de Efecto Hall (D.E.H.) se caracteriza por generar una tensión  $u$  entre placas proporcional al campo magnético  $B$  que lo atraviesa, cuando por él circula una corriente eléctrica  $I$  constante (que es independiente de la corriente eléctrica  $i$  a medir).

De esta forma el D.E.H. se emplea para captar el campo magnético  $B_1$  generado en el núcleo del transformador por el efecto de la corriente eléctrica continua  $i$  que se pretende medir.

El convertidor de tensión en corriente  $A_1$ , transforma la tensión generada por el D.E.H. en una corriente eléctrica  $i_o$  que, circulando por el secundario del transformador, genera un campo magnético  $B_2$  de la misma intensidad y opuesto a  $B_1$ , anulándolo. Así se evita que el núcleo del transformador se sature por el

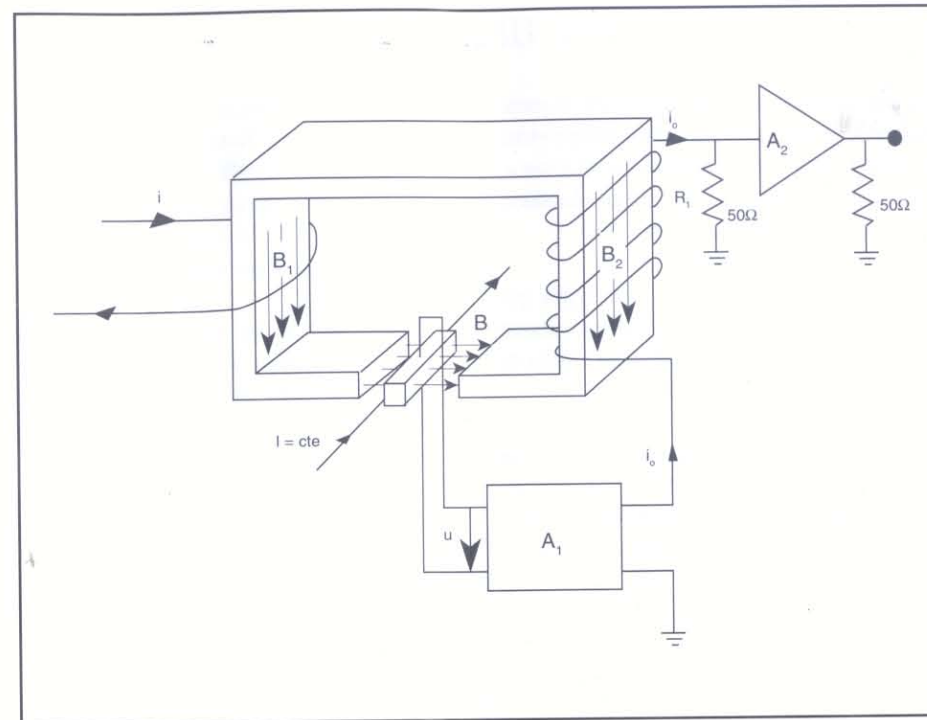


Figura 14. Circuito equivalente de una sonda activa de corriente.

efecto de la corriente continua  $i$ . Por último, la corriente eléctrica  $i_o$  sobre la resistencia  $R_1$  provoca una caída de tensión que, amplificada por  $A_2$ , es la medida proporcional de la intensidad de corriente eléctrica  $i$  que se pretende medir.

Si la corriente  $i$  no tiene componente continua, entonces el funcionamiento de la sonda activa es en todo análogo al de una pasiva pues el D.E.H. no genera ninguna tensión.

Los anchos de banda de las sondas activas de corriente son inferiores a los correspondientes a las sondas pasivas (típicamente van desde DC hasta los 50MHz). Contrariamente a lo que puede parecer, la limitación de ancho de banda no se debe al D.E.H. (con bandas pasantes bien por encima del GHz), sino al amplificador

de baja frecuencia  $A_1$ , que se utiliza, por razones de diseño, como filtro limitador del ancho de banda del sistema de medida. En efecto, el ruido aleatorio generado por el D.E.H. tiene un espectro de frecuencia constante en toda la banda pasante de dicho dispositivo. Así, limitando el ancho de banda a una frecuencia baja, se reduce el valor RMS de dicho ruido lo que, en definitiva, revierte en una mayor sensibilidad (en términos de relación señal-ruido) del sistema de medida.

## 6. OTROS TIPOS DE SONDAS

A la lista de sondas hasta aquí presentada, se puede añadir muchos más tipos, pues prácticamente existe una clase de sonda para cada fenómeno físico que se pretende analizar (eléctrico, térmico, óptico, lumínico, dinámico, etc). Cabría citar brevemente:

- Las sondas reconocedoras de palabra lógica, que generan como salida una señal de disparo cuando en su entrada se da una combinación lógica de unos y ceros preseleccionada.
- Las microsondas de tensión, que son típicamente sondas activas de tensión de reducidísimas dimensiones especialmente diseñadas para acceder a todos los puntos de un circuito integrado.

— Las sondas fotométricas y radiométricas, que se emplean para medir luminancias (cantidad de luz emitida por una superficie, expresada en candelas por metro cuadrado ó nits) e iluminancias (cantidad de luz recibida por una superficie, expresada en lumens por metro cuadrado o luxes).

— Y, para finalizar, las sondas ópticas, que son transductores optico-eléctricos que convierten la potencia luminosa emitida por una fuente en tensión eléctrica.

PARA MAS INFORMACION CONTACTE CON:

Tektronix Española, S. A.  
Condesa de Venadito, 1 - 5.º  
28027 Madrid  
Teléfono (91) 404 10 11  
Fax (91) 404 09 97

Tarragona, 141-157, 4.º, 2.ª  
08015 Barcelona  
Teléfono (93) 425 39 11  
Fax (93) 424 66 07

**Tektronix**

¡SOLICITE NUESTRA PUBLICACION EL ABC DE LAS SONDAS!