

# Generadores de funciones y formas de onda arbitrarias con elevado nivel de salida, de Tektronix

Artículo cedido por Tektronix. Inc.



Traducido y adaptado —  
por Juan Ojeda de  
AFC Ingenieros S.A.  
(jojeda@afc-ingenieros.  
com)

*Los generadores de funciones y formas de onda arbitrarias con elevado nivel de salida simplifican las medidas en las aplicaciones de automoción, semiconductores, científicas e industriales*

*Hay diversas aplicaciones de diseño electrónico que requieren estímulos con amplitudes que superan la capacidad de los generadores de funciones y formas de onda arbitrarias disponibles en el mercado de hoy en día. Estas aplicaciones incluyen semiconductores de potencia, tales como MOSFETs e IGBTs, que se utilizan ampliamente en los sistemas electrónicos de automóviles y equipos de alimentación, amplificadores para cromatografía de gases, detectores de espectroscopia de masas y otros en aplicaciones científicas e industriales.*



Los generadores de funciones y formas de onda arbitrarias comunes proporcionan amplitudes de hasta 10 Vpp sobre 50 ohmios y 20 Vpp en circuito abierto. Los dispositivos anteriormente mencionados operan a menudo en un rango de tensión dos veces mayor. Hasta ahora, las pruebas de estos dispositivos en todo su rango de frecuencia requerían un amplificador de potencia para incrementar la señal proporcionada por un generador estándar. Este aumento de la complejidad del montaje de la prueba, creaba incertidumbre sobre la amplitud efectiva en la salida del amplificador y se añadía al coste del equipamiento.

Esta nota de aplicación describe el método convencional de generación de señales de amplitud elevada utilizando un amplificador de potencia externo. A continuación se describirán las aplicaciones típicas y se mostrarán los beneficios de la utilización de los generadores de funciones y formas de onda arbitrarias integrados con una etapa de elevado nivel de salida integrada. Las aplicaciones descritas en esta nota incluyen la medida de las características temporales y de conmutación de los semiconductores de potencia para aplicaciones de automoción y la

caracterización de los amplificadores para los detectores de cromatografía de gases.

## El método convencional

La figura 1 muestra la configuración típica de medida utilizando un generador de funciones y formas de onda arbitrarias estándar y un amplificador de potencia adicional para incrementar la amplitud de salida al nivel requerido. La salida del generador se conecta a la entrada del amplificador. Algunos amplificadores permiten configurar las entradas y/o salidas para adaptarse a impedancias diferentes de fuentes y/o cargas. Generalmente, los amplificadores de potencia no disponen de una pantalla, por ello, la amplitud de la salida efectiva de salida debe controlarse con un osciloscopio o con algún otro dispositivo de medida. Esto se suma a la complejidad de la configuración de la medida y hace que se invierta más tiempo, especialmente cuando los niveles de amplitud se necesitan ajustar y verificar antes y durante la prueba.

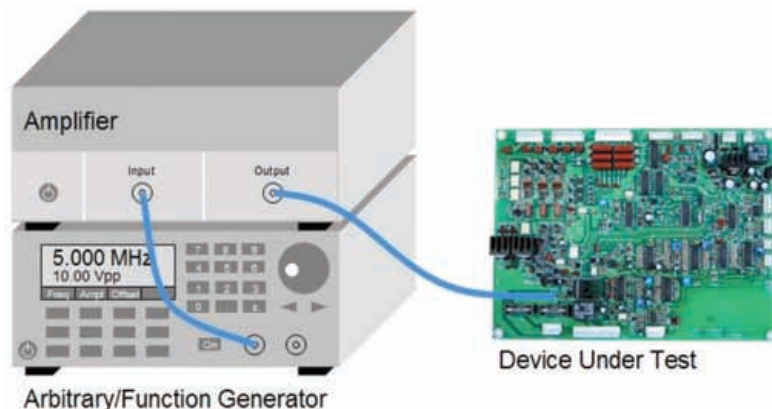
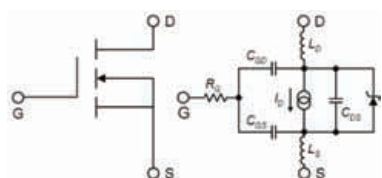


Figura 1. Preparación del sistema de medida cuando se utiliza un amplificador externo.

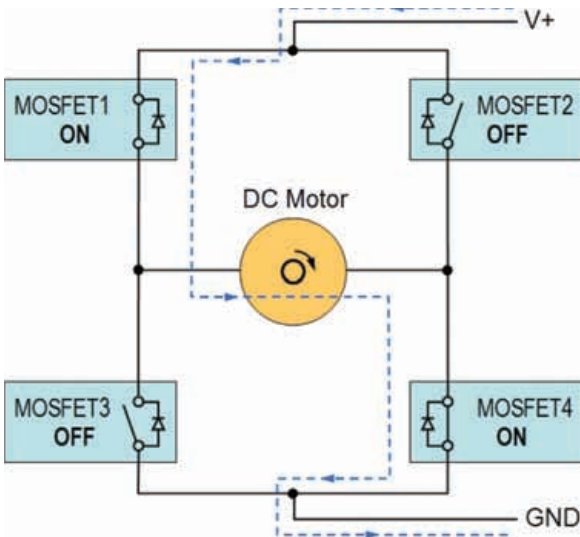
### Medida del tiempo de conmutación de MOSFETs de Potencia

Los MOSFETs de potencia se utilizan en diversos controles del movimiento de los automóviles, gestión de la alimentación eléctrica y aplicaciones de control climático. Controlan pequeños motores, solenoides, frenos con anti-bloqueo, direcciones asistidas eléctricas y los sistemas de estabilidad electrónicos, así como circuitos de ignición de las lámparas HID (High Intensity Discharge). También son un componente clave de los motores de arranque y de los alternadores.

La figura 2 muestra un ejemplo de varios MOSFETs utilizados en una topología de puente en 'H' para controlar un motor de CC. Esta configuración proporciona el funcionamiento hacia delante y hacia atrás de motores y funciones de frenado. Cuando se utiliza como conmutador, la función básica del MOSFET es la de controlar la corriente a través del drenador (D: Drain) mediante la señal de la puerta (G: Gate). En estas aplicaciones, el tiempo de conmutación es un criterio importante a considerar por los diseñadores del circuito durante la selección del componente. Las prestaciones de conmutación del MOSFET se determinan por el tiempo necesario para establecer las variaciones de tensión de acuerdo a sus capacidades internas (véase la Figura 3). Se debe tener en cuenta que la tensión puerta-fuente (G-S) debe cargar primero la capacidad de entrada del MOSFET hasta su nivel de umbral característico antes de que la conducción de la corriente por el drenador (D) pueda empezar a producirse.

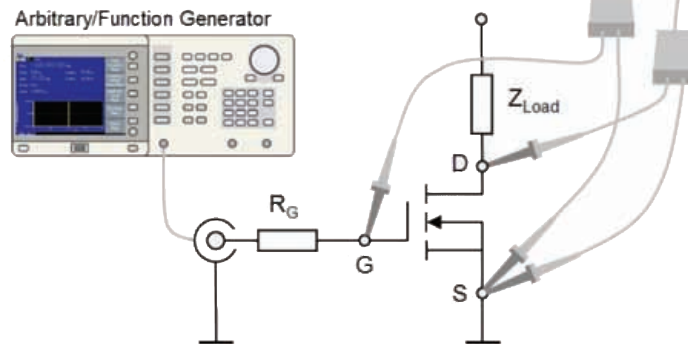


Los parámetros de interés relacionados con tiempo son el retardo entre el estado activo e inactivo y los tiempos de subida y bajada entre dichos estados. Para medir estos parámetros, la entrada del MOSFET se estimula con un pulso estrecho del generador de señal y se miden

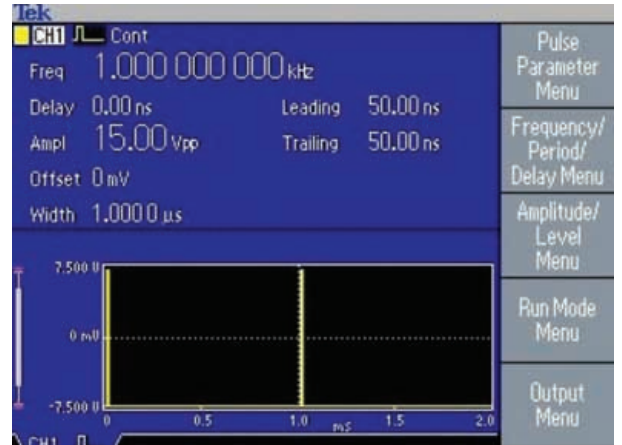


las tensiones de la puerta y del drenador con un osciloscopio (véase la Figura 4).

La utilización de un generador de funciones y formas de onda arbitrarias con una etapa de potencia integrada en lugar de un amplificador externo permite al usuario una visibilidad directa de la amplitud de la señal efectiva en la entrada del circuito del MOSFET sin la necesidad de medirla con un osciloscopio.



El retardo en el paso del estado inactivo al activo se puede determinar ahora convenientemente a través de medidas realizadas con cursores sobre la traza que aparece en la pantalla del osciloscopio. El retardo en el paso del estado inactivo al activo es el tiempo que transcurre desde el momento en



que la tensión entre la puerta (G) y la fuente (S) llega a un 10% de su valor final hasta que la tensión en el drenador (D) disminuye al 90% de su valor inicial. Del mismo modo, el retardo en el paso del estado activo al inactivo es el tiempo transcurrido desde el momento en el que la tensión entre la puerta (G) y

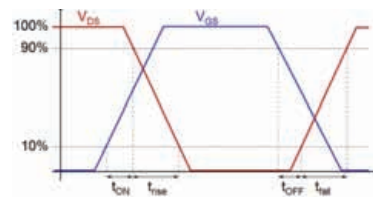


Figura 5. El AFG3011 muestra la amplitud de la salida directamente en la pantalla.

Figura 2. Configuración en puente-H de cuatro MOSFETs para el control de un motor de CC.

Figura 6. Medida del tiempo de conmutación de un MOSFET de potencia.

Figura 4. Configuración para la medida del tiempo de conmutación de un MOSFET de potencia.

Figura 3. Esquema de un MOSFET y su circuito equivalente.

### Análisis de las formas de onda de conmutación de un IGBT

En los últimos años, los transistores bipolares de puerta aislada (IGBT) han ido encontrando cada vez un mayor uso en aplicaciones industriales y de automoción como reemplazo de los MOSFETs, esto se debe a la alta velocidad de conmutación, la capacidad de manejar corrientes elevadas, las grandes tensiones de bloqueo, las sencillas características del control de puerta, menores pérdidas de conducción y caídas de tensión en el estado activo.

Las aplicaciones industriales de los IGBTs incluyen la tracción, el control de motores de velocidad variable, las fuentes de alimentación ininterrumpida (UPS), el calentamiento por inducción, la soldadura y las fuentes de alimentación conmutadas de alta frecuencia para sistemas de telecomunicación y servidores. En la industria de automoción, los IGBTs tienen una fuerte demanda para los circuitos del control de bobinas de encendido, reguladores de motores y sistemas relacionados con la seguridad.

Los IGBTs son un cruce entre los transistores bipolares y los MOSFETs. En cuanto a las características de conmutación y conducción de la salida, los IGBTs se asemejan a los transistores bipolares. Sin embargo, mientras que los transistores bipolares se controlan por corriente, los IGBTs se controlan por tensión como los MOSFETs. Para asegurar la saturación completa y limitar la corriente de cortocircuito, se recomienda una tensión de control de puerta de +15 V.

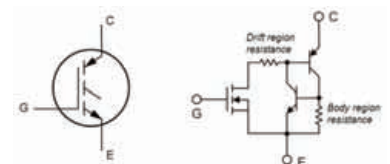
Al igual que un MOSFET, un IGBT tiene capacidades entre la puerta (G), el emisor (E) y el colector (C). Cuando se aplica tensión entre los terminales de puerta (G) y emisor E, la capacidad de entrada se carga a través de la resistencia  $R_G$  de la puerta de manera exponencial hasta que se alcanza la tensión umbral característica del IGBT que es justo donde se establece la conducción de emisor. Del mismo modo, la capacidad de entrada puerta-emisor se debe descargar a

un nivel umbral específico antes de que la conducción colector-emisor se interrumpa y el IGBT pase al estado inactivo.

El tamaño de la resistencia de la puerta afecta de manera significativa a las características dinámicas del cambio entre los estados activos e inactivos de los IGBT. Una resistencia pequeña proporciona unos tiempos más reducidos de carga y descarga de la capacidad puerta-emisor (G-E) de un IGBT, dando como resultado tiempos cortos de conmutación y pequeñas pérdidas de conmutación. Sin embargo, una resistencia de pequeño valor puede también causar oscilaciones debidas a la capacidad puerta-emisor (G-E) del IGBT y la inductancia parásita de los conductores. Para reducir las pérdidas en el estado inactivo y mejorar la inmunidad del IGBT al ruido inyectado debido a los cambios de la tensión colector-emisor que pueden ser sustanciales en el caso de cargas inductivas, se recomienda que el circuito de control de puerta incluya polarizaciones importantes en los estados "on/off".

Las prestaciones de los IGBTs varían según la aplicación y el circuito de control de puerta debe ser diseñado en consecuencia. En las aplicaciones de conmutación más extremas, tales como los controladores de motores o las fuentes de alimentación ininterrumpida, los parámetros del control de puerta deben ser seleccionados de manera que la forma de onda de conmutación no supere la zona de operación segura del IGBT. Esto puede implicar un sacrificio en la veloci-

dad de conmutación a expensas de mayores pérdidas en la conmutación. En las aplicaciones de conmutación menos exigentes, en las que la forma de onda de conmutación está dentro de la zona de operación segura, el control de puerta puede ser diseñado para tiempos cortos de conmutación y menores pérdidas de conmutación.



Para optimizar el diseño del control de puerta de un IGBT, el ingeniero de diseño debe comprender las características del dispositivo de conmutación en las condiciones de carga real. Para analizar estas características de conmutación, la puerta del IGBT se estimula con una serie de pulsos individuales, mientras que la tensión puerta-emisor (VGE), la tensión colector-emisor (VCE) y la corriente del colector ( $I_C$ ) se miden con un osciloscopio. Gracias a su capacidad para generar pulsos de elevada amplitud, el generador de funciones y formas de onda arbitrarias AFG3011 es ideal para esta tarea. Puesto que la tensión colector-emisor (VCE) del IGBT tiene un rango dinámico muy elevado para las cargas inductivas, la medida requiere una sonda diferencial de alta tensión. La tensión puerta-emisor (VGE) se puede medir con una sonda pasiva estándar y la corriente de colector ( $I_C$ ) con una sonda de corriente no-intrusiva.

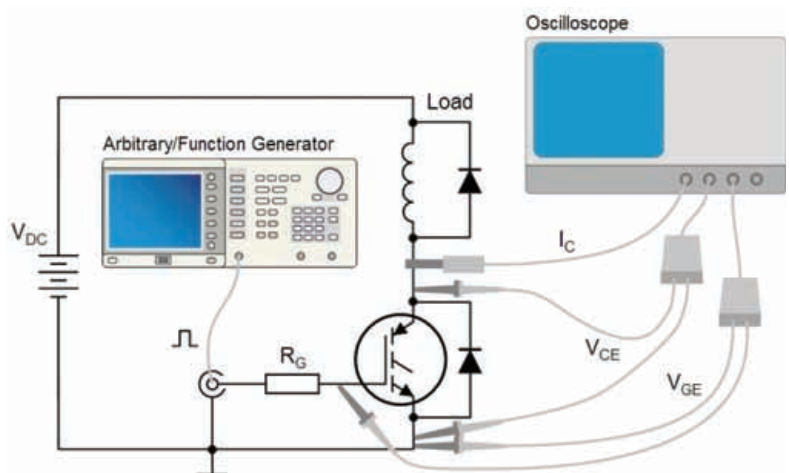
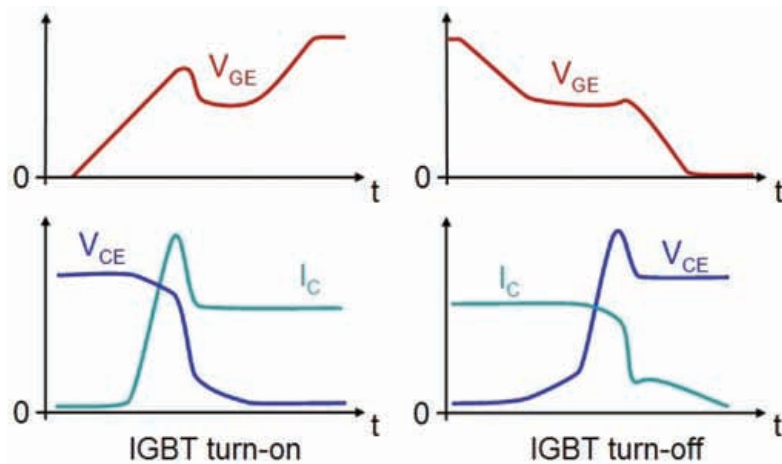


Figura 7. Símbolo del circuito de un IGBT y su circuito equivalente.

Figura 8. Circuito de control de puerta de un IGBT y circuito de prueba de conmutación.

La Figura 9 muestra las formas de onda típicas de conmutación de un IGBT con carga inductiva. A partir de estas formas de onda, el ingeniero de diseño puede determinar la energía de conmutación, las pérdidas en el estado activo y si el IGBT está operando en la zona de operación segura. Basándose en los datos de medida, el ingeniero puede determinar entonces si la frecuencia de repetición del pulso seleccionado, la amplitud y los flancos de las transiciones son adecuados para alcanzar los objetivos del diseño.

Si se necesitan ajustes, las teclas de atajo dedicadas del panel frontal del AFG3011 proporcionan acceso directo a todos los parámetros del pulso. A continuación, dichos parámetros pueden ser convenientemente modificados mediante el mando rotativo o el teclado numérico sin introducir interferencias/espúrios en la señal generada y sin necesidad de interrumpir la prueba. Esto último no ocurre con muchos de los generadores del mercado.



Durante la medida se deben considerar diversos factores, tales como el retardo de propagación entre sondas (skew), el "offset" y el ruido inherente a las sondas. El ingeniero encontrará beneficioso utilizar un osciloscopio con una herramienta de software que se encargue de las cuestiones relacionadas con los ajustes de las sondas, que calcule automáticamente las pérdidas de potencia de conmutación y que determine el área de operación segura de los IGBT.

### Caracterización de amplificadores de cromatografía de Gases

La cromatografía de gases es una técnica de separación y análisis de la existencia y concentración de productos químicos en una muestra compleja. Con esta técnica lo que se va a analizar se vaporiza e inyecta en un flujo continuo de un gas portador inerte, comúnmente helio, por su elevada conducción térmica. Para detectar las características de la muestra en el gas portador, hay disponibles diferentes tipos de detectores, cada uno con sus ventajas y desventajas particulares.

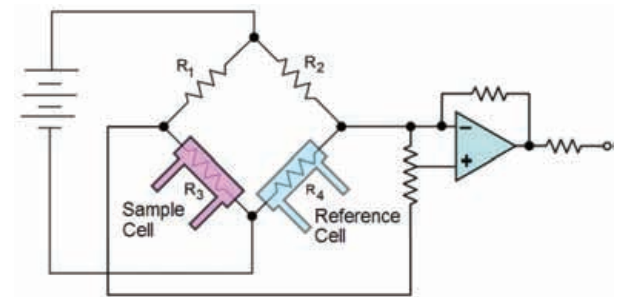
Uno de los tipos más comunes de los detectores de cromatografía de gases es el detector de conductividad térmica (TCD). Aunque hay disponibles detectores más sensibles y especializados, los TCDs siguen siendo populares debido a su construcción sencilla, robustez, flexibilidad, sensibilidad, linealidad y bajo costo.

Un TCD consiste en una célula

de muestra y otra de referencia. La célula de la muestra se utiliza para caracterizar lo que se va a analizar. La célula de referencia contiene sólo gas portador. Cada célula contiene un elemento de calefacción colocado en la trayectoria del flujo del gas y está controlado en temperatura. Las medidas con un TCD se realizan mediante la medida de los cambios de la resistencia de los elementos calientes causados por las variaciones de temperatura durante el flujo de los gases que se analizan.

Los elementos de calefacción son filamentos o termistores. La resistencia de los filamentos aumenta con la temperatura (coeficiente positivo de la resistencia) y la resistencia de los termistores disminuye con la temperatura (coeficiente negativo de la resistencia). La elección del elemento calefactor depende de la temperatura en el interior de la célula y de las propiedades de la sustancia medida.

Figura 10. Detector de conductividad térmica y puente de Wheatstone.



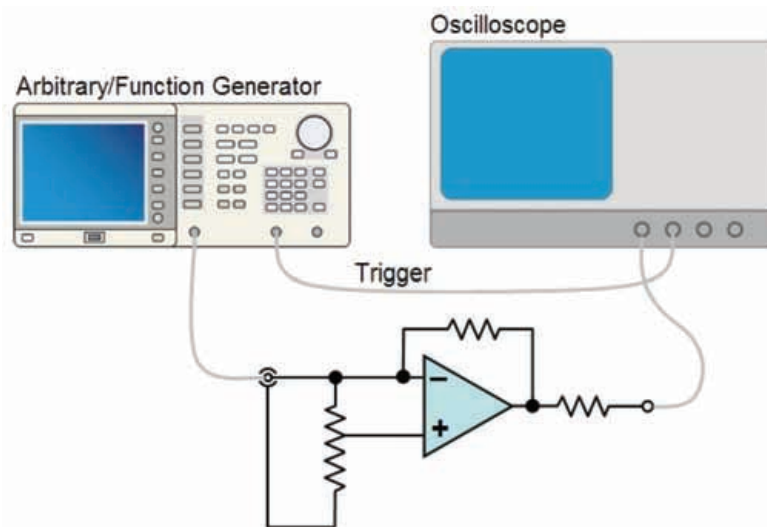
Cuando en las células está presente sólo el gas portador, la energía térmica fluye de una forma estable desde elemento calefactor al cuerpo del detector. Cuando la sustancia a analizar se introduce en la célula de la muestra, la conductividad térmica dentro de la célula cambia, el elemento calefactor se calienta y cambia su resistencia. Los elementos de calefacción de la muestra y la celda de referencia están a menudo incorporados en los brazos de un circuito de tipo puente de Wheatstone (véase la figura 10). En esta configuración, las variaciones en la resistencia del elemento de calefacción dentro de la célula de la muestra cambia la tensión de salida del puente.

La sensibilidad de un TCD depende del flujo de corriente a través de los elementos de calefacción y de la temperatura en el interior de las células. Las corrientes más altas incrementan el cambio de tensión en el puente de medida y dan como resultado temperaturas más altas, pero esto puede también acortar la vida del filamento. Estos compromisos deben tenerse en cuenta cuando se realiza el diseño eléctrico. En la práctica, la tensión de salida del puente está comprendida entre 15 V y 20 V.

La salida del puente de medida está conectada a un amplificador. Una red de resistencias a la entrada del amplificador permite la selección de diferentes rangos de sensibilidad.

Figura 9. Formas de onda de conmutación de un IGBT.

Figura 11. Configuración de medida para la caracterización del amplificador.



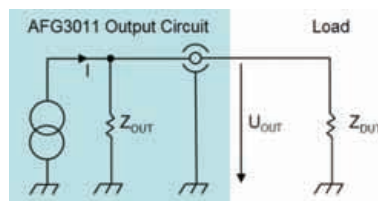
A la salida del amplificador, un convertidor analógico/digital muestrea la señales y las convierte en formato digital para su procesamiento por un procesador digital.

El diseñador del amplificador de medida debe caracterizar el amplificador en cuanto al ancho de banda, la rapidez de respuesta, la respuesta al escalón, la linealidad y el rango dinámico. Esto requiere diversas señales de entrada con diferentes formas, frecuencias y amplitudes. Sería poco práctico generar todas estas señales de entrada a través de las medidas reales hechas con el TCD. La utilización de un generador de funciones y formas de onda arbitrarias para simular la señal del puente de Wheatstone es mucho más cómoda y ofrece una mayor flexibilidad. La figura 11 muestra la configuración de la medida. Un osciloscopio mide la salida del amplificador.

Si la salida de un generador de funciones y formas de onda arbitrarias está limitada a amplitudes máximas de 10 Vpp sobre cargas de 50 ohmios, se requiere un amplificador separado para aumentar el nivel de señal al rango de 15 V a 20 V similar al generado normalmente por el puente de Wheatstone. El uso un generador de funciones y formas de onda arbitrarias como el AFG3011 de Tektronix, que es capaz de ofrecer estos niveles de gran amplitud de un IGBT directamente, simplifica la configuración de la medida. También proporciona visibilidad directa al usuario y el control sobre la amplitud eficaz de la señal de prueba con la que se alimenta el amplificador.

### Señal de amplitud y de Impedancia de carga

La tensión de salida proporcionada por un generador de señal depende de la impedancia de la carga conectada o del dispositivo bajo prueba. La razón de esto radica en la impedancia de salida del generador. Como ejemplo, la figura x muestra el circuito equivalente de la salida del AFG3011. Dependiendo del ajuste de amplitud, el instrumento proporciona una cierta corriente I. Si una carga ZDUT de 50 ohmios Ω está conectada a la salida del generador, la mitad de corriente I atraviesa impedancia de salida del generador ZOUT y la otra mitad atraviesa la impedancia ZDUT. Si ZDUT es de impedancia significativamente mayor que Zout, entonces casi toda la corriente fluye a través de Zout, lo que da como resultado una tensión de casi el doble de la que se produce sobre una carga de 50 ohmios.



Las hojas de especificaciones de los generadores de funciones y formas de onda arbitrarias indican normalmente las amplitudes máximas de salida para cargas de 50 ohmios y para cargas de alta impedancia. Por ejemplo, la amplitud de la salida del

AFG3011 se especifica como 20 Vpp para cargas de 50 ohmios y 40 Vpp en circuito abierto. Para otros valores de impedancia de carga, la tensión máxima de salida se puede calcular con la fórmula siguiente:

$$\text{Max } U_{\text{OUT}} = \frac{40 \text{ V}_{\text{PP}}}{1 + \frac{50 \Omega}{Z_{\text{DUT}}}}$$

En su configuración estándar los generadores de funciones y formas de onda arbitrarias están normalmente configurados para una impedancia de carga de 50 ohmios. Para otras impedancias de carga, el valor de la impedancia se puede configurar en el instrumento para hacer posible que la visualización de los valores de la amplitud y del "offset" aparezca ya corregida. En la serie AFG3000, el ajuste de la impedancia de carga se realiza en el menú de salida (Output Menu), que se hace accesible después de pulsar el botón de la función deseada, por ejemplo, "Seno".

Se debe tener en cuenta que el ajuste del valor de la impedancia de carga no altera la impedancia de salida del generador, ni la impedancia de carga en sí misma. Solo afecta a la visualización de la amplitud y del "offset" y garantiza que el instrumento muestre los valores correctos de amplitud eficaz sobre la carga conectada.

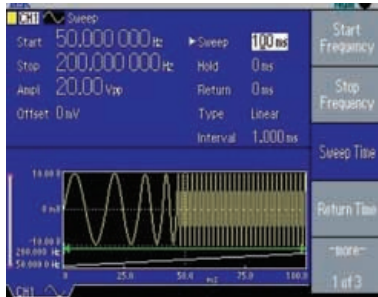


Cuando llega el momento de medir el ancho de banda del amplificador, configurar el generador de funciones en modo de barrido, seleccionar la amplitud, ajustar las frecuencias de inicio y parada, así como el tiempo de barrido de acuerdo a sus especificaciones de diseño, el AFG3011 de Tektronix permite un cómodo acceso a estos parámetros mediante las teclas de acceso directo del panel frontal y las teclas de selección alrededor de la pantalla. La gran pantalla del generador muestra todos los ajustes que se necesitan, incluida la amplitud y una representación gráfica de la forma de onda, proporcionando

Figura 13. Selección de impedancia de carga en la serie AFG3000.

Figura 12. Circuito equivalente de la salida del AFG3011.

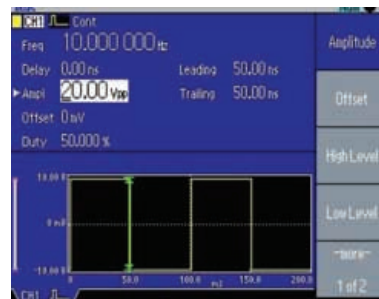
una confianza plena en la configuración del instrumento. Utilizando un osciloscopio con disparo en el momento del inicio del barrido de frecuencia del generador se puede obtener la respuesta del amplificador.



Al realizar las medidas sobre la traza de la pantalla del osciloscopio se debe usar un cursor horizontal para encontrar el nivel de amplitud de -3 dB, que es equivalente al 70,71% del valor de pico. A continuación, mientras se observa la traza en la pantalla del osciloscopio, se debe reducir el rango del barrido mediante el ajuste de las frecuencias de inicio y parada del generador hasta que la traza comience en el límite de ancho de banda inferior y termine en el límite de ancho de banda

superior. El ancho de banda del amplificador se puede determinar entonces mediante la lectura de la última configuración de las frecuencias de inicio y parada en el generador de señal.

Como otro ejemplo de medida, vamos a considerar como se determina el tiempo de subida del amplificador. Esto último proporciona una medida de la capacidad del IGBT del amplificador para detectar picos estrechos en la señal de medida del TCD, ya que son generados por pequeñas cantidades de la muestra en el gas portador. La configuración de la medida es la misma que se muestra en la Figura 11, excepto que la línea de disparo ya no es necesaria. El generador de funciones y formas de onda arbitrarias se configura para generar pulsos. Los osciloscopios digitales



modernos miden la respuesta al escalón del amplificador y proporcionan una lectura directa de los tiempos de subida y bajada de la señal mediante medidas automáticas.

### Conclusión

Los generadores de funciones y formas de onda arbitrarias modernos como el AFG3011 permiten la generación de amplitudes de señal de hasta 20 Vpp sobre cargas de 50 ohmios directamente y 40 Vpp sobre alta impedancia, sin el uso de un amplificador de potencia externo. Esto simplifica el montaje de prueba y reduce el costo del equipamiento en muchas aplicaciones. También ahorra tiempo de medida, ya que el generador muestra la amplitud efectiva directamente en su pantalla, haciendo que la medida por separado con un voltímetro sea redundante.

Más allá de las aplicaciones de prueba descritas en esta nota, los generadores de funciones y formas de onda arbitrarias de gran amplitud se utilizan también en pruebas de displays, tecnología MEMS, solenoides, así como para la espectrometría de masas y las aplicaciones científicas relacionadas.

Figura 14. Parámetros de ajuste del barrido de frecuencias para la prueba del ancho de banda del amplificador.

Figura 15. Parámetros de ajuste del pulso (escalón).