

Capítulo 6

Generadores y sintetizadores

La realización de medidas con instrumentos electrónicos requiere, a veces, la utilización de instrumentos auxiliares para disponer de señales de alimentación o de prueba.

La gama de equipos disponibles para la generación de señales es muy extensa y con escasa normalización. Esto se hace patente, en especial, en los denominados generadores de formas de onda arbitrarias, donde es el propio usuario quien define todas las características de las señales de salida.

En este capítulo se describen los principios de funcionamiento de los generadores más simples y frecuentes, para dar una visión panorámica de sus posibilidades. En este caso, como en ningún otro, hay que acudir a los catálogos de los fabricantes y a los manuales de los instrumentos, para conocer la amplia oferta disponible y sus detalles.

6.1 FUNCION Y TIPOS

Se denomina generador a toda fuente de señal calibrada y estable. No es un equipo que mida ninguna magnitud. Sus aplicaciones habituales están en los campos del test y el mantenimiento. También son necesarios para el funcionamiento de algunos dispositivos que convierten una señal eléctrica en una señal distinta (eléctrica o de otra forma física).

Se aplican así para la obtención de la respuesta frecuencial o temporal de amplificadores, y el análisis de su linealidad, caracterización y sintonía de filtros, estudio de la sintonía de receptores, caracterización de materiales y componentes a distintas frecuencias, aplicación de señales de test en sistemas digitales, etc.

El esquema de bloques elemental de un generador de señal consiste en: un oscilador o generador propiamente dicho, con posibilidad de seleccionar su frecuencia de trabajo; una etapa que determina la forma de onda de la señal; y

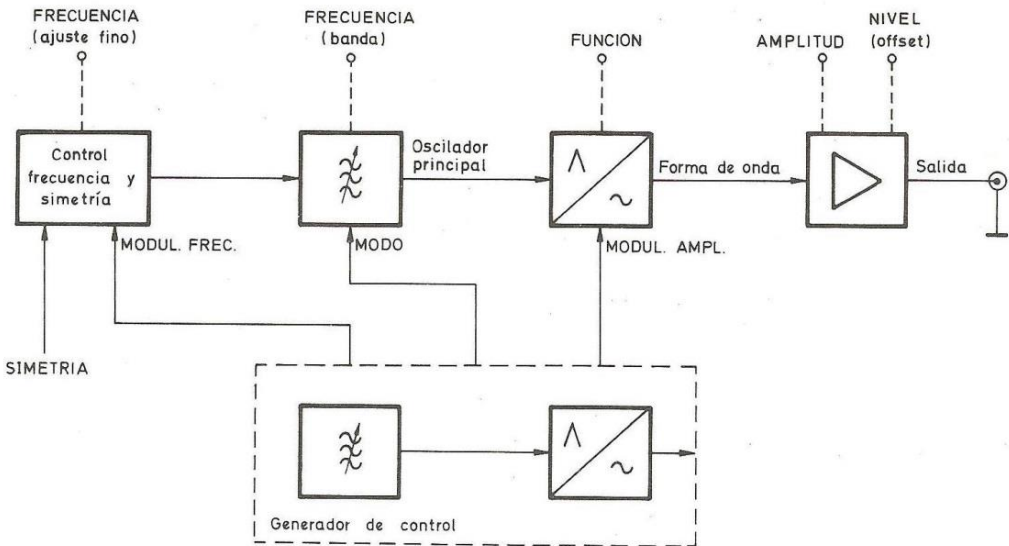


Figura 6.1 Esquema de bloques de un generador de funciones.

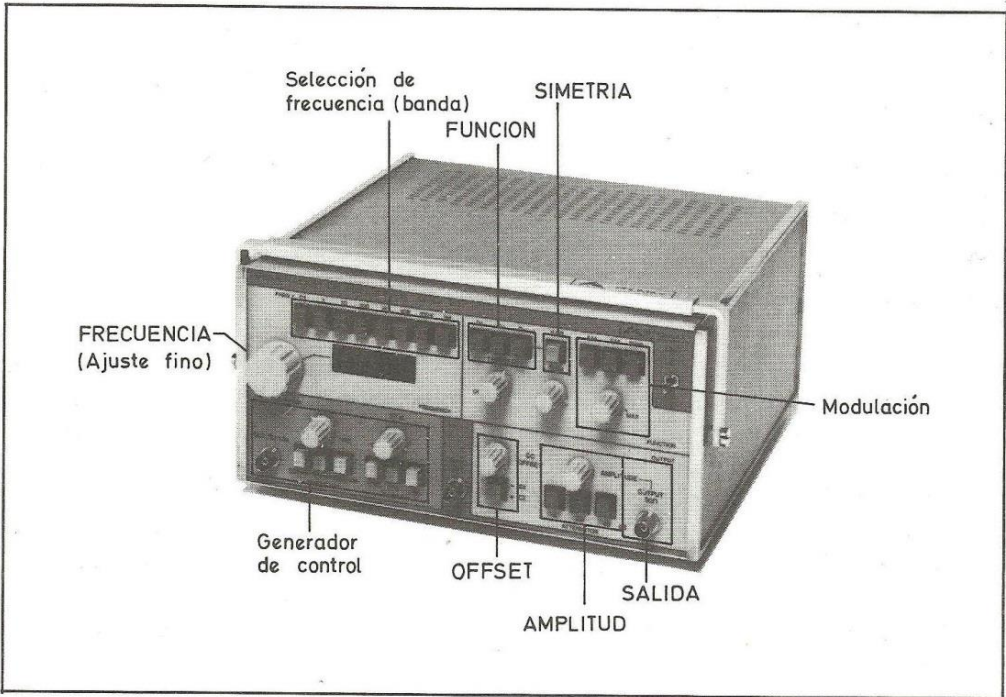


Figura 6.2 Generador de funciones con capacidad de modulación interna. (Cortesía de Instrumentación Electrónica Promax S.A.)

una etapa de salida donde se ajustan la amplitud y nivel de continua de la salida.

De acuerdo con esto, dos criterios básicos para clasificar los generadores son la banda de frecuencias que cubre, y las formas de onda que permite obtener.

Según las frecuencias, los términos empleados para la designación de los instrumentos no se refieren a la denominación de la banda, sino al tipo de técnica de generación empleada. Por ejemplo, es normal que en un generador de audiofrecuencia (AF) se alcancen frecuencias mayores y menores que las de audio (20 Hz-20 kHz), empleando técnicas iguales o similares a las de audio.

Los principales grupos son: generadores de audiofrecuencia (AF): desde menos de 0,01 Hz a 1 o 10 MHz; generadores de radiofrecuencia (RF): 1 a 10 kHz a 520 a 1000 MHz; y generadores de señales de microondas: 1 a 40 GHz (no en un único instrumento).

Según la forma de onda de salida, se habla de: generadores de funciones (triangular, cuadrada, senoidal); generadores de señales (senoide con modulación), osciladores (senoide con amplitud y/o frecuencia fijas) y generadores de barrido (modulación FM lenta y cíclica); generadores de pulsos (pulsos, cuadrada); generadores de ruido; generadores de palabras digitales y datos; generadores de miras TV; generadores de formas de onda arbitrarias; etc.

El método de generación también permite distinguir unos generadores de otros. Hasta el presente, la mayoría se han basado en osciladores de frecuencia variable, pero cada vez hay más modelos basados en la síntesis de frecuencias.

6.2 GENERADORES DE FUNCIONES

Se designan como generadores de «funciones» a aquellos equipos que producen señales que pueden describirse mediante fórmulas matemáticas simples (=«funciones»). En ellos se busca más la versatilidad que la exactitud, ofreciendo una distorsión típica de 0,25 %.

Las formas de onda obtenidas son: la triangular, que se emplea para medidas de nivel de disparo, estudios de linealidad, etc.; la cuadrada, que se aplica, entre otras, al análisis de la respuesta transitoria; y la senoidal, que es adecuada para la obtención de la respuesta frecuencial.

En la figura 6.1 se presenta el esquema de bloques de un generador de funciones con capacidad de modulación interna, mediante un generador de control, como en el modelo de la figura 6.2. En los más simples, como el de la figura 6.3, sólo hay el generador principal y entradas para modulación con señales externas. Si hay modulación interna y la moduladora está disponible, puede que en ella se tengan señales de frecuencia menor a la del generador principal. No suelen estar basados en los circuitos integrados LSI disponibles, porque éstos ofrecen poco margen de frecuencias y bastante distorsión.

El oscilador principal produce las señales triangular y cuadrada. Consiste en un bucle de realimentación no lineal que consta de un integrador y un conmutador con histéresis, que compara la salida de áquel con una tensión de

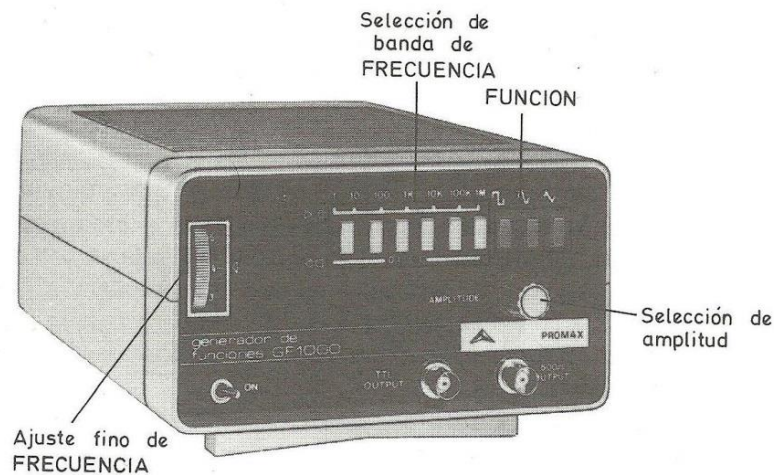


Figura 6.3 Generador de funciones simple. (Cortesía de Instrumentación Electrónica Promax S.A.)

referencia, tal como se indica en la figura 6.4. El esquema de bloques completo, incluyendo los controles de frecuencia y simetría, es el de la figura 6.5.

La frecuencia de la triangular depende de la corriente de carga y descarga de un condensador, C , de la capacidad de éste, y de la amplitud de la cuadrada. Esta última es fija, por lo que se emplean la variación de C , para seleccionar la banda (décadas), y la de la corriente I , para ajustar continuamente la frecuencia, dentro de una banda.

La banda total de frecuencias cubre normalmente desde 0,1 Hz a 1 MHz, o más, pero hay modelos que abarcan desde 0,00003 Hz hasta 50 MHz. La exactitud de la frecuencia indicada por el selector suele ser baja ($\pm 5\%$), pero esto no importa mucho si se dispone un frecuencímetro en paralelo.

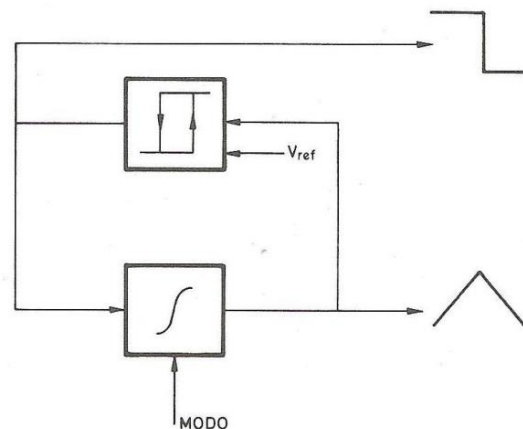


Figura 6.4 Generación de una señal triangular y una cuadrada.

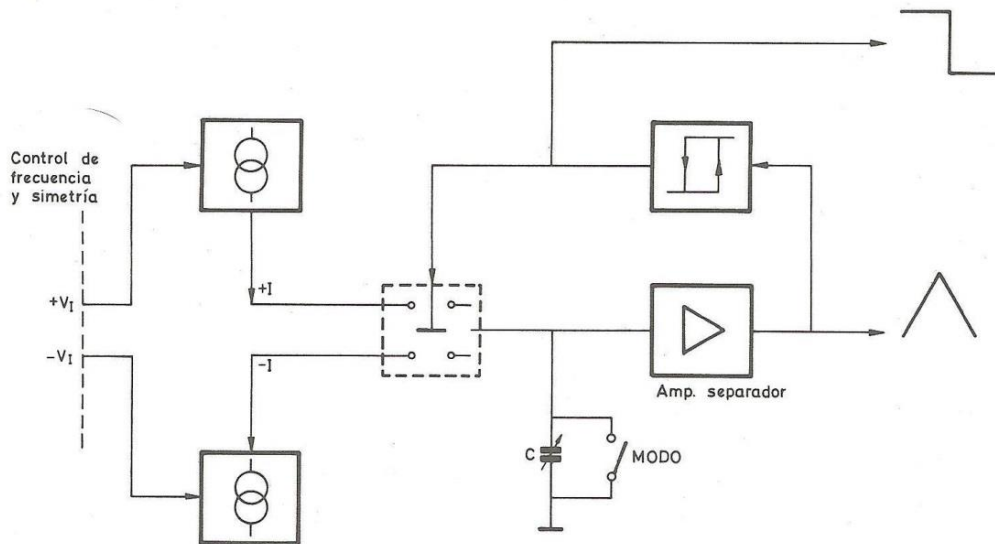


Figura 6.5 Esquema de bloques del oscilador de un generador de funciones.

Para frecuencias muy bajas, si se empleara un integrador con condensador surgiría el problema de la resistencia de fugas del propio condensador, que limita la frecuencia de corte inferior. Por esta razón, se emplea ahí un oscilador principal distinto, basado en un contador digital (figura 6.6). La señal de contar/descontar (U/D, up/down) procede del conmutador con histéresis. Con este sistema, como la relación de división de frecuencias puede ser muy alta, la frecuencia de salida puede ser muy baja.

El MODO de funcionamiento se refiere a la cadencia de la salida: continua (free run), previo disparo (triggered), en salva (burst, gated), etc. Algunos modelos permiten iniciar y acabar la oscilación en un punto o fase determinados de la forma de onda (start/stop).

Cuando no se desea una salida continua se cortocircuita el condensador del integrador. Cuando se aplica una tensión externa suficiente, se suprime el cortocircuito que se instala de nuevo siempre que la triangular haya alcanzado

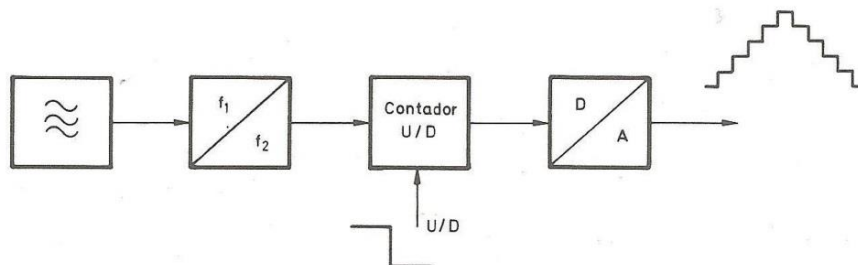


Figura 6.6 Integrador para frecuencias muy bajas.

el nivel de final de ciclo y la entrada de control descienda por debajo del umbral elegido (burst), o bien se haya completado un único ciclo (trigger).

La salida senoidal se obtiene mediante un circuito analógico no lineal, basado en diodos o transistores apareados, a cuya entrada se aplica la señal triangular. La pendiente de ésta va siendo modificada por las sucesivas etapas, hasta dar una senoide aproximada. Para obtener distorsiones inferiores, hay que emplear un generador de señales basado en un oscilador de puente de Wien o LC, o en un sintetizador.

Además de las FORMAS DE ONDA habituales, es frecuente una salida de pulsos TTL, y, a veces, una salida en rampa, coseno u otras desfasadas 90° respecto a las principales.

Para la generación de señales TTL se emplea la señal triangular para acortar, mediante una puerta Y (AND) TTL, la duración de la cuadrada. Si, por ejemplo, se elige como umbral el 30 % del valor de pico de la triangular, el pulso TTL dura un 15 % del periodo. Como el flanco de subida del pulso coincide con el de la cuadrada de la salida principal, la señal TTL se puede usar para sincronismo. Si internamente hay varias puertas Y en paralelo, en esta salida se dispone de más corriente, y se pueden atacar cargas de 50Ω .

A la salida de la etapa donde se determina la forma de onda, está, en su caso, el modulador de amplitud, basado en una señal interna (del generador de control) o externa.

Los controles de FRECUENCIA Y SIMETRÍA permiten ajustar, respectivamente, la frecuencia de la salida, dentro de una banda, y la duración de sus semiciclos positivo y negativo. Ambos basan su acción en el control de la tensión que regula las fuentes de corriente (carga-descarga) del integrador. El esquema de bloques de esta etapa puede ser tal como el de la figura 6.7.

La frecuencia de la salida se puede determinar mediante un potenciómetro (ajuste fino o dial del instrumento), o bien puede hacerse variable, cubriendo todo un campo. La tensión para controlar esta variación puede ser interna o externa (entrada VCO).

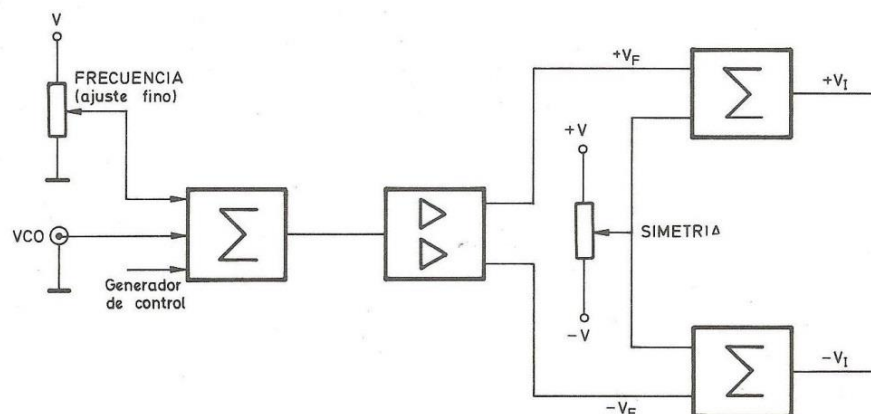


Figura 6.7 Etapa de control de frecuencia y simetría.

Para hacer un barrido interno (sweep) el generador de control da una señal en diente de sierra que es la que controla la frecuencia del oscilador principal. Puede hacerse un barrido lineal o logarítmico. En el primer caso, se emplea igual tiempo en cada frecuencia, mientras que en el segundo se emplea igual tiempo en cada década, es decir, se dedica más tiempo a las frecuencias más bajas del barrido.

Cuando se aplica una tensión externa a la entrada VCO (o VCF), es esta tensión, junto con el dial, la que determina la frecuencia de la salida. Si la señal aplicada es una rampa, se hace un barrido. El campo de ésta puede cubrir desde 10:1 hasta 1000:1.

En la etapa de salida se determina la amplitud de la señal y su nivel de continua. El nivel de salida mínimo es importante porque da una idea del nivel de ruido presente en ésta. Esta etapa suele estar protegida contra cortocircuitos y contra la aplicación de tensiones externas.

La impedancia de salida es uno de los parámetros más importantes de los generadores, y debe ser adecuada a los circuitos donde se va a conectar. Para trabajar con señales cuadradas y pulsos, por ejemplo, suele ser necesario que sea de 50Ω . En cambio, en sistemas de audio lo típico son 600Ω .

6.3 GENERADORES DE PULSOS

Los generadores de pulsos ofrecen pulsos o trenes de pulsos de tensión o de corriente (para transformadores de pulsos y otros circuitos magnéticos) no como salida secundaria como en otros generadores, sino como salida fundamental, y a veces única.

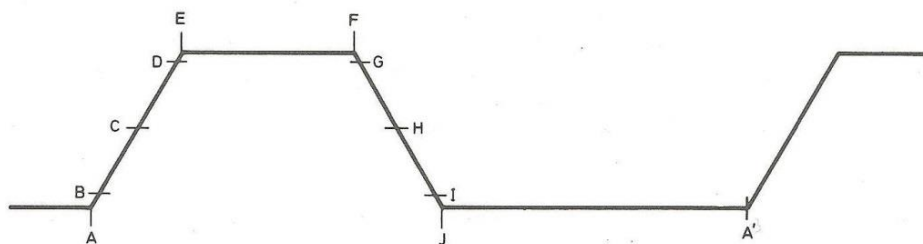


Figura 6.8 Puntos para definir los parámetros de un pulso.

Se entiende aquí por pulso una señal que pasa de un nivel inicial a uno final en un intervalo finito de tiempo, y luego retorna al nivel inicial en otro tiempo. Los parámetros que definen un pulso son (figura 6.8):

- 1) La amplitud y polaridad.
- 2) El tiempo de subida, BD, (10-90 % amplitud), en el flanco anterior, AE.
- 3) El tiempo de bajada, GI, (90-10 % amplitud), en el flanco posterior, FI.
- 4) El tiempo de duración, CH, (50 % amplitud) o anchura del pulso.

5) El periodo del pulso, AA, que coincide con el recíproco de la frecuencia de repetición si es una señal periódica.

6) El retardo, respecto a una referencia, que es el tiempo desde ésta hasta C.

Tanto el tiempo de subida como el de bajada se denominan tiempos de transición. Hay otros parámetros, como son el rebasamiento, tiempo de establecimiento, etc.

Los pulsos se emplean como estímulo o entrada a un sistema, observando luego en un osciloscopio la respuesta de éste. Se pueden medir, así, parámetros como el tiempo de conmutación, el tiempo de propagación, el tiempo de retardo, el tiempo de recuperación, etc., en circuitos digitales, y también se pueden obtener los datos equivalentes a la respuesta frecuencial.

Los denominados generadores de datos (o palabras digitales) generan trenes de pulsos que simulan información o datos digitales.

El esquema de bloques de un generador de pulsos es el de la figura 6.9. La señal cuadrada procedente de un oscilador pasa, sucesivamente, por dos monoestables, que determinan su retardo (respecto a una señal de sincronismo, que se ofrece como salida) y su duración. Un integrador posterior determina los tiempos de transición, mientras que un recortador y un amplificador final determinan las características de salida: amplitud, polaridad y línea base (nivel de continua).

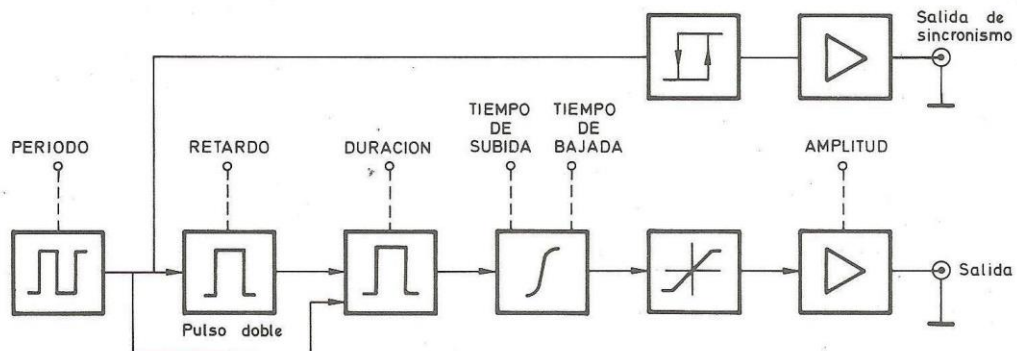


Figura 6.9 Esquema de bloques de un generador de pulsos.

La acción de los monoestables y el integrador sobre la señal del oscilador se representa en la figura 6.10. Obviamente, los tiempos de transición no son instantáneos tal como se presenta, pero se ha procedido así para destacar la función de cada etapa.

Los pulsos dobles son interesantes para medidas de velocidad de recuperación de circuitos. Se obtienen haciendo que el monoestable que determina la duración sea disparado no sólo por el flanco posterior del pulso que sale del monoestable que determina el retardo, sino también por el flanco anterior de la señal del oscilador.

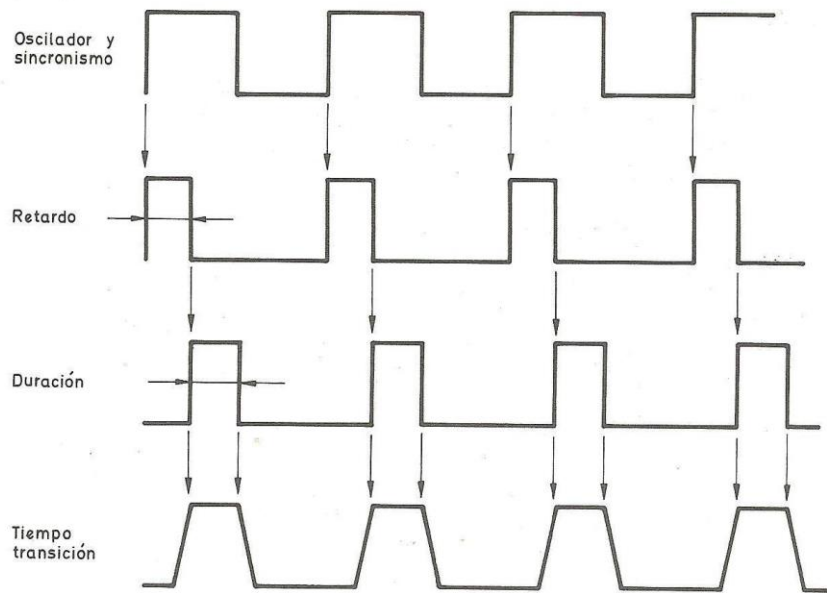


Figura 6.10 Determinación de los tiempos de un pulso.

Los controles de que se dispone normalmente permiten ajustar: el periodo de repetición, entre 10 MHz y 250 MHz o más; la duración, desde menos de 2 ns hasta 10^4 s; el retardo, respecto a la señal de sincronismo; los tiempos de transición (permiten generar desde triangulares hasta trapezoidales); la amplitud, que puede ser de hasta 20 V en circuito abierto (10 V en 50 Ω); la polaridad; y la línea de base.

Como opciones adicionales se pueden señalar: pulsos complementarios; salidas con amplitud fija (TTL, ECL,...); funcionamiento en ciclo único, o con disparo externo (síncrono o asíncrono), determinación externa de la duración, etc. El modelo de la figura 6.11 dispone de la mayor parte de estas posibilidades.

6.4 SINTETIZADORES DE FRECUENCIA

Un sintetizador es un dispositivo cuya frecuencia de salida es un múltiplo racional de una frecuencia de referencia patrón (estándar) determinada, de forma que puede expresarse como

$$f_s = \frac{N}{M} f_r$$

Al obtener la frecuencia de salida mediante operaciones matemáticas realizadas en la frecuencia patrón (que es muy estable), y no a partir de las variaciones de frecuencia de un oscilador, se obtiene una señal con frecuencia

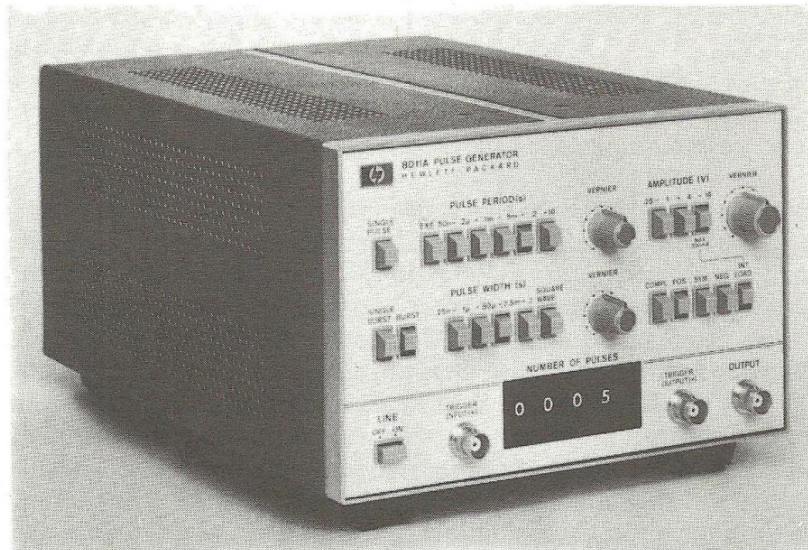


Figura 6.11 Generador de pulsos. (Cortesía de Hewlett-Packard Española S.A.). Los controles están agrupados de acuerdo con su función.

exacta y estable, elegible y variable dentro de un amplio campo, con alta resolución. Se cubren frecuencias desde 10^{-6} Hz hasta más de 10^{10} Hz, con estabilidades de 10^{-8} /día a 10^{-10} /día.

La selección de frecuencia se hace mediante dígitos que actúan sobre dispositivos programables y con velocidad de conmutación rápida. Esto los hace especialmente adecuados para sistemas de prueba automáticos.

A veces, instrumentos que disponen de un banco de osciladores de cristal y sintetizan la salida a partir de la combinación de sus frecuencias se denominan «sintetizadores».

Hay tres tipos principales de sintetizadores. En los que emplean la síntesis directa se realizan operaciones aritméticas directas (suma, resta, multiplicación, división) sobre la frecuencia de referencia original (o armónicos de ésta). Es un método caro, apto para sistemas complejos.

En la síntesis indirecta, mediante un PLL se hace que un VCO sintonice (se «enganche») a una frecuencia deducida de la referencia. Es el método habitual en equipos ordinarios.

La síntesis digital consiste en obtener digitalmente las muestras de la señal deseada, normalmente una senoide, y luego con un convertidor D/A y un filtro se obtiene la senoide de salida. Es un método frecuente en generadores de bajo coste, con pequeño ancho de banda.

6.4.1 Síntesis indirecta

Para sintonizar un oscilador de frecuencia variable a la frecuencia de un armónico derivado de la frecuencia patrón, se puede emplear el esquema de la

figura 6.12. Los dos divisores de frecuencia están constituidos por sendas cadenas de contadores. Cuando el oscilador se ha sintonizado, se cumple

$$\frac{f_0}{M} = \frac{f_r}{N}, \quad f_0 = \frac{M}{N} f_r$$

donde M y N son enteros. La estabilidad de f_0 a largo plazo será la que tenga f_r , multiplicada por M/N . La estabilidad a corto plazo será la misma o la del VCO, según que el ancho de banda del bucle de realimentación sea grande o pequeño, respectivamente.

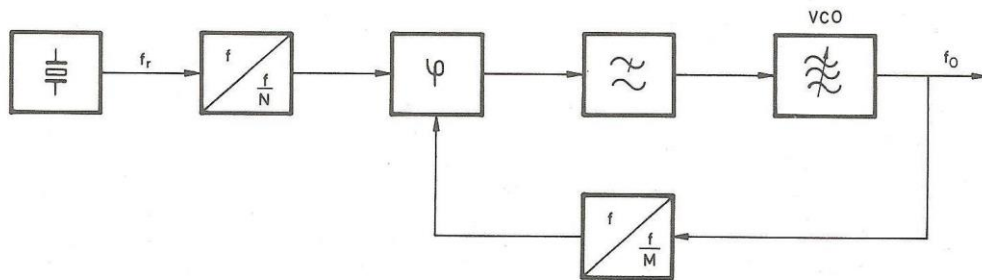


Figura 6.12 Síntesis de frecuencia indirecta.

Debido a que la resolución de la salida viene dada por f_r/N , si se desea tener alta resolución, el ancho de banda del lazo debe ser pequeño para evitar las fluctuaciones rápidas de f_r . Pero entonces se tarda varios ciclos de f_r/N para engancharse, lo que supone un tiempo de adquisición largo y, además, no se evitan las fluctuaciones rápidas del VCO.

Una solución es dividir la frecuencia de salida del VCO. Se aumenta así la resolución sin tener que reducir el ancho de banda del lazo, ya que se sigue comparando con f_r/N . La limitación de esta técnica está en que el divisor del lazo debe operar a una frecuencia superior a la deseada, y los contadores tienen una velocidad de operación limitada. Puede superarse esta limitación a base de lazos de realimentación múltiples.

Como ejemplo, considérese el esquema de la figura 6.13. Se parte de un oscilador a cristal, de 1 MHz, y hay tres bloques de divisores. Uno fijo por 10^4 , previo al comparador de fase. Otro en la cadena de realimentación, que se puede variar entre 10^4 y $2 \cdot 10^5$, para seleccionar la frecuencia dentro de una banda, factor M . Y el último, posterior al VCO, que divide por un factor entre 1 y 10^7 , y permite determinar la banda (mediante 3 bits).

La frecuencia de salida vendrá dada por la relación

$$f_0 = \frac{f_r \cdot M}{10^4 \cdot 10^B}$$

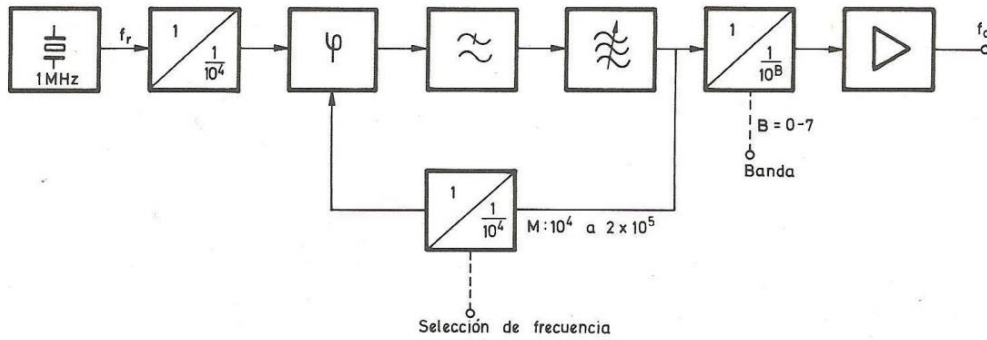


Figura 6.13 Sintetizador que cubre desde 0,1 Hz hasta 20 MHz.

El campo de variación de la frecuencia de salida será, pues, desde 0,1 Hz, para $B=7$ y $M=10^4$, hasta 20 MHz, para $B=0$ y $M=2 \cdot 10^5$.

El bajo coste de la síntesis indirecta viene dado en parte por la ausencia de filtros selectivos. Incluso, a baja frecuencia, puede realizarse empleando sólo circuitos integrados. Como inconvenientes cabe citar que son difíciles de modular, que sus tiempos de conmutación son relativamente largos (del orden de milisegundos), y que tienen alta susceptibilidad a bandas laterales de ruido FM a las frecuencias más altas. Si, por ejemplo, la sensibilidad de VCO es del orden de 1 MHz/V, bastan unos microvoltios de ruido en la entrada de fase para tener «ruido FM» a su salida.

En la figura 6.14 se presenta un sintetizador que ofrece modulación de amplitud y fase, y barrido de frecuencias desde 10 Hz hasta 21 MHz.

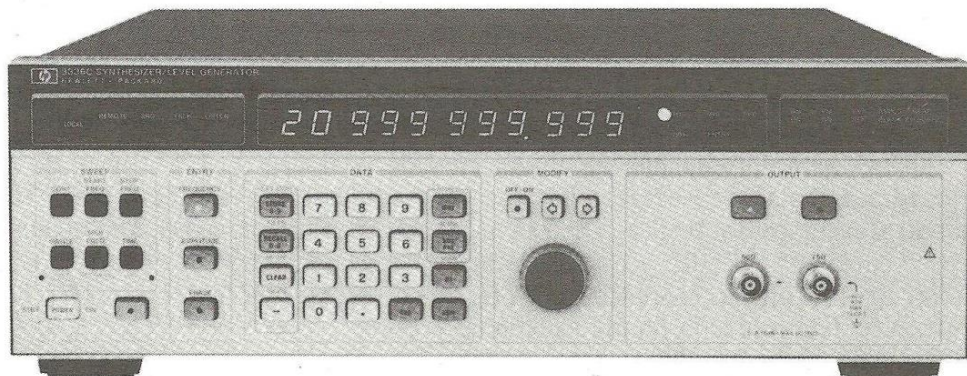


Figura 6.14 Sintetizador de frecuencia con capacidad de modulación de amplitud y fase, y barrido de frecuencias en la banda de 10 Hz hasta 21 MHz. (Cortesía de Hewlett-Packard Española S.A.)

6.4.2 Síntesis digital

Puede considerarse en cierto modo como un caso particular de síntesis directa, por cuanto no hay osciladores enganchados.

Aunque a veces se emplean métodos basados en un oscilador digital, o en un reloj de frecuencia variable y una tabla (memoria ROM) que contiene una secuencia de valores instantáneos, equidistantes, de la forma de onda deseada, lo más habitual es emplear una tabla de este tipo junto con un reloj de frecuencia fija. En este caso, la frecuencia de la salida viene determinada por la forma como se leen los valores escritos en la tabla. Si, por ejemplo, se leen uno a uno, el tiempo necesario para que la salida describa un ciclo completo es N veces mayor que el que se tarda si se leen de N en N . La frecuencia de salida se selecciona digitalmente, a través de N , y conserva la estabilidad de la frecuencia de referencia, ya que es ésta la que dicta el instante en que se hace la lectura.

El esquema básico consta de un acumulador de fase que determina cuál de las muestras instantáneas almacenadas se va a buscar, y un convertidor fase-amplitud que obtiene el valor correspondiente. Su funcionamiento para el caso de una senoide es el que sigue (figura 6.15): se calcula, periódicamente y en tiempo real, un ángulo de fase linealmente creciente, $\theta = 2\pi f_0 \cdot t$ donde f_0 es la frecuencia deseada (seleccionada numéricamente en el panel frontal, N) y t se mide en periodos de la frecuencia patrón de referencia f_r , es decir, en el instante j , $t = j \cdot T_r$. De este modo, a cada periodo de reloj la salida del acumulador se incrementa en $2\pi f_0$. Luego se busca en una memoria los valores de $\sin \theta$. Las muestras de salida repiten su valor con una frecuencia que es la de rebasamiento del acumulador. Si éste es de k bits, la frecuencia f_s con que se produce su rebasamiento es

$$f_s = N \cdot f_r / 2^k$$

donde f_r y k son fijas. Cuanto mayor sea N (f_0), antes rebasa el acumulador. A la vez, la señal final de salida contendrá menos muestras. La resolución en la frecuencia de salida es $f_r / 2^k$.

Para ahorrar memoria, se almacenan sólo los valores de $\sin \theta$ correspondientes al primer cuadrante y se añade un control de cuadrante externo. A la vez, un circuito de complemento a 2 o a 1 permite simplificar el direccionamiento de la memoria. Ya que las señales de salida de ésta no cambian simultáneamente, es necesario disponer un registro a su salida. Para poder disponer simultáneamente de salida seno y coseno, hay que añadir otros dos registros de la forma indicada en la figura 6.15.

Para economizar más memoria aún, se emplean identidades trigonométricas, y la selección del ángulo se hace mediante una parte gruesa y una parte fina.

La generación de otras formas de onda es simple. Si, por ejemplo, se pasa directamente de la salida del acumulador al convertidor D/A, se genera una señal en forma de diente de sierra. Si lo que interesa es un barrido FM, basta poner como entrada digital la salida de un contador.

Con este sistema se logra una conmutación de frecuencias rápida, y una resolución elevada (depende del tamaño del acumulador y el número de bits). Se emplean pocos componentes y la mayoría son circuitos integrados monolíticos (salvo los filtros de salida y partes del convertidor D/A).

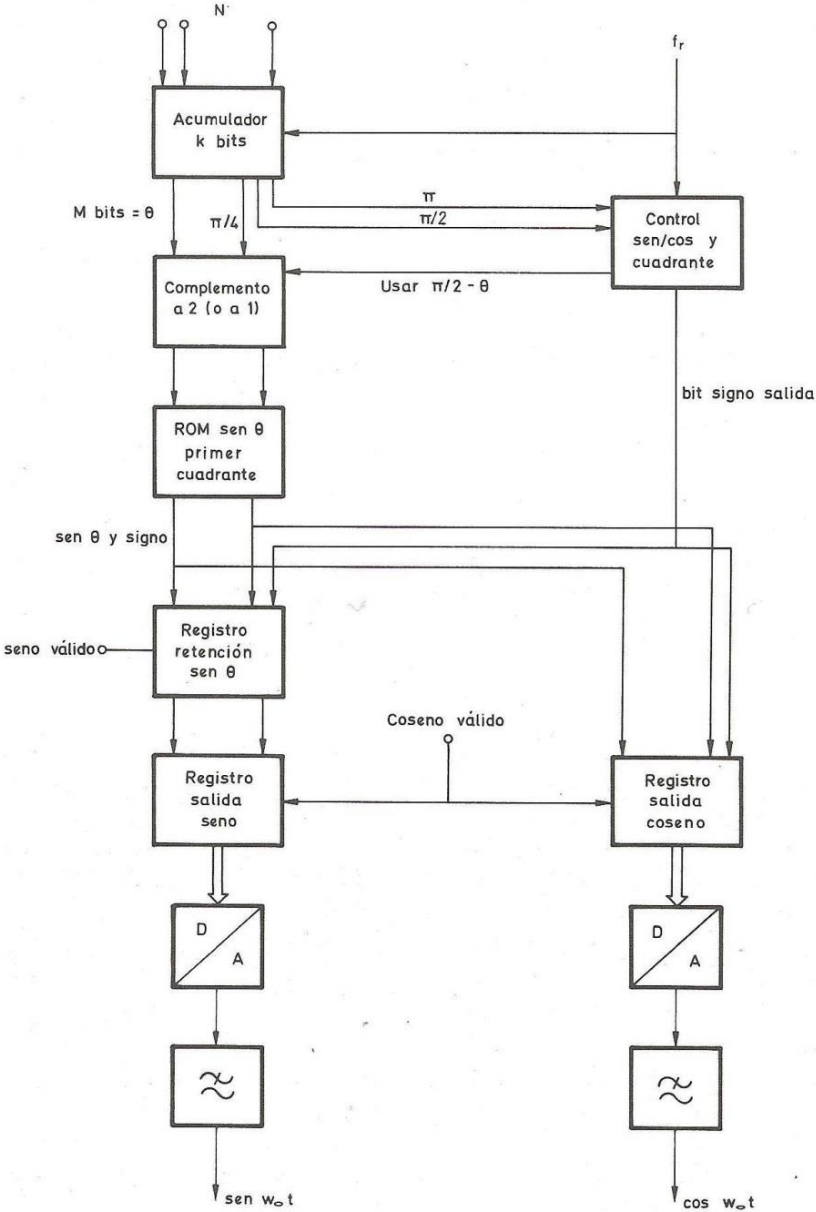


Figura 6.15 Sintetizador digital.

Como desventajas cabe citar que, el ancho de banda de la salida viene limitado por la velocidad de las memorias (ROM) y que los convertidores D/A deben ser de muy alta calidad.