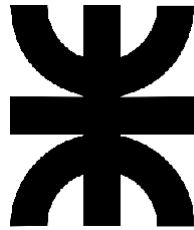


UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



MEDIDAS ELECTRÓNICAS 2  
ANALIZADOR DE ESPECTRO DE BARRIDO PARA MODULACIONES  
DIGITALES

---

26 de agosto de 2019



Figura 1: Signal Hound USB-SA44B Spectrum Analyzer



Figura 2: Signal Hound VSG25A Generador de señales vectoriales

## 1. Introducción

En la presente guía se desarrollará la aplicación del Analizador de espectro de barrido USB-SA44B Spectrum Analyzer de la marca Signal Hound como el que se observa en la figura 1. Las señales a analizar serán obtenidas por el generador de señales vectoriales VSG25A de la misma marca, figura 2.

El objetivo de este trabajo es entender el funcionamiento del analizador de espectro de barrido para señales de radio frecuencia que se pueden observar tanto en un laboratorio como en un ambiente laboral. A partir del manejo de los parámetros y controles de configuración de este instrumento se puede analizar e identificar cualquier señal perteneciente a una comunicación inalámbrica, las cuales se utilizan mucho en los trabajos finales de la carrera.

Un analizador de espectro es un instrumento que se utiliza para medir la magnitud de una señal de entrada dada con el rango de frecuencia completo del instrumento. Se utiliza principalmente para medir el espectro de señales conocidas y desconocidas. El espectro muestra datos en un gráfico, donde la amplitud se representa en el eje y y la frecuencia en el eje x.

Ambos instrumentos se encuentran en el Laboratorio de Comunicaciones de la Facultad Regional de Córdoba. El generador de señales vectoriales es capaz de producir muchas de las señales complejas utilizadas en la industria de las comunicaciones inalámbricas. Con un rango de frecuencia de  $100\text{MHz}$  a  $2,5\text{GHz}$ , amplitud de salida de  $-40\text{dBm}$  a  $+10\text{dBm}$  y  $100\text{MHz}$  de ancho de banda de modulación, el VSG25A cubre la mayoría de las frecuencias de telecomunicaciones, así como dos bandas ISM principales ( $902 - 928\text{MHz}$  y  $2,4\text{GHz}$ ). Se puede usar hasta  $80\text{MHz}$  y de  $-80\text{dBm}$  a  $+13\text{dBm}$  con un rendimiento reducido.

En el corazón del VSG25A hay un modulador de cuadratura impulsado por un generador de formas de onda arbitrario (AWG como el que se ve en la unidad de sintetizadores de frecuencia) que consta de 2 canales DAC de 12 bits, un sintetizador digital directo (DDS) y memoria de patrones. Las formas de onda representan los canales I y Q de la señal compleja que se producirá.

Dentro del generador de forma de onda arbitraria, hay una memoria de estrechamente acoplada de 4k palabras. Estas palabras pueden representar una frecuencia instantánea o un valor I o Q. Esto puede no parecer mucho pero

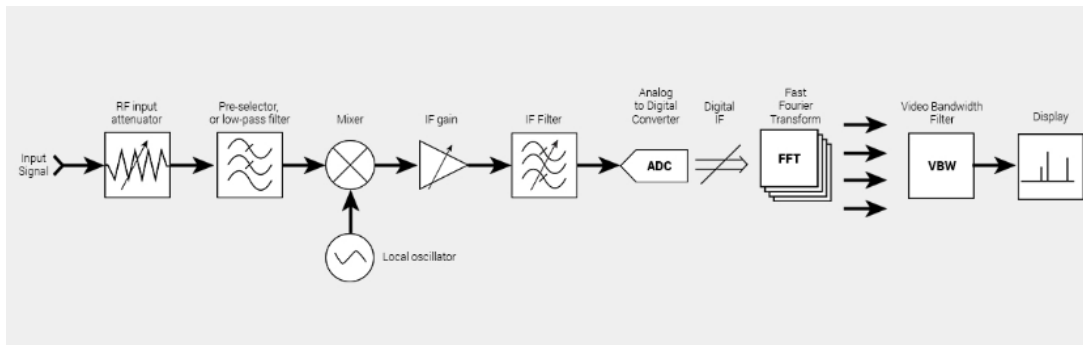


Figura 3: Diagrama en Bloque de un Analizador de Espectro digital

cuando se combina con el reloj DAC flexible, esto puede representar 512 símbolos QAM-256 con un filtro de coseno en relieve aplicado, a prácticamente cualquier velocidad de datos de 16 kSPS a 45 MSPS.

Hay aproximadamente 47 dB de control de ganancia disponibles para una resolución completa de 12 bits. Al usar menos bits, es posible controlar más de 80 dB de ganancia. El período de forma de onda también se puede establecer más largo que la longitud del patrón. Esto es ideal para generar pulsos con forma periódica. La memoria de patrón se sincroniza a una velocidad de 800 kHz a 180 MHz, dividida por un preescalador (1 a 15). El período del patrón comparte el reloj de 800 kHz a 180 MHz, pero tiene un preescalador separado y un contador de 16 bits, para períodos de hasta  $15 * 65535 = 983025$  ciclos de reloj.

Mientras que el analizador de espectros Signal Hound USB-SA44B es un analizador de espectro económico de 1 Hz a 4,4 GHz y receptor de medición con un preamplificador de RF. Es capaz de realizar una amplia gama de mediciones, con anchos de banda de resolución de menos de 1 Hz a 250 kHz. El demodulador I / Q interno captura hasta 2 megabytes de información por segundo, con un ancho de banda limitado por hardware de 250 KHz. Los barridos con tramos mayores que esto son en realidad una combinación de muchos barridos más pequeños, matemáticamente combinados para rechazar imágenes y respuestas espurias.

A continuación se explicará el funcionamiento del analizador de espectros. Luego se explicarán las modulaciones disponibles y el uso del generador.

## 2. Controles de un analizador de espectro

El software necesario para utilizar este instrumento se llama **Spike** y puede ser descargado desde esta pagina <https://signalhound.com/spike/>, luego de una breve instalación se puede observar la pantalla como la de la figura 4. Los controles principales que se van a utilizar en este práctico se observan en la pantalla de la siguiente forma:

- En el sector izquierdo se agrupan los controles para realizar las mediciones, empieza con la selección del *trace* en el cual se debe mantener como en la figura 5a, el botón de **export** sirve para exportar la medición en formato .csv.
- Para guardar una imagen se debe ir a la barra de herramientas **File -> Save as Image**
- Luego por el mismo sector izquierdo se observa el menú de marcadores como se observa en la figura 5b, en el

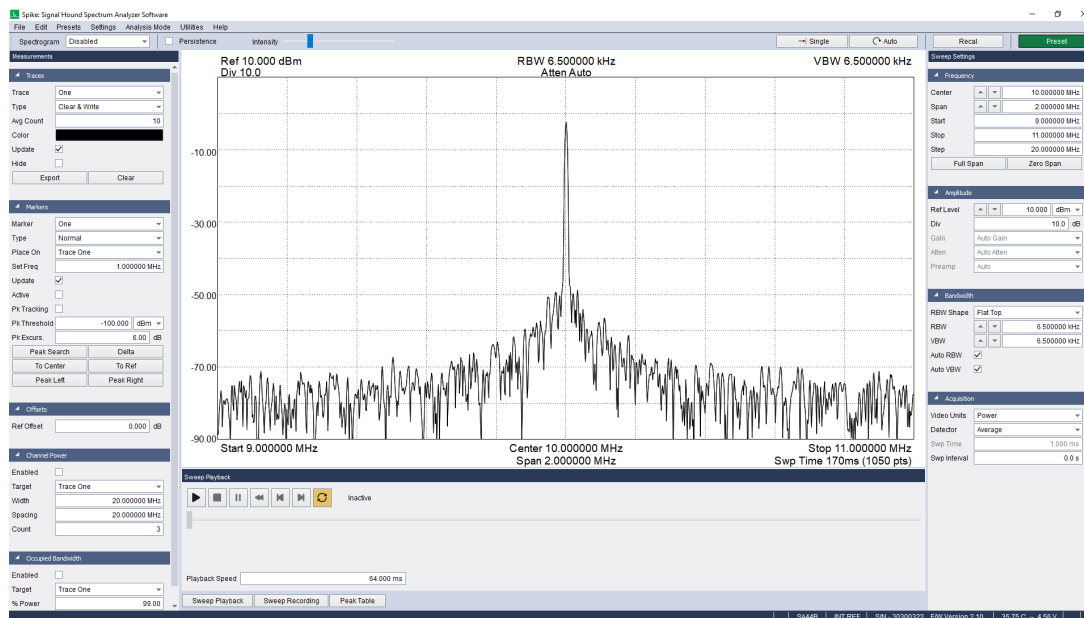


Figura 4: Spike

cual se puede seleccionar la cantidad de marcadores, el tipo (Noise <sup>1</sup> o Normal). Con las siguientes opciones se puede elegir la frecuencia a la cual se coloque, buscar picos de amplitud y demás.

- Las opciones de Offsets, Channel Power y Occupied Bandwidth **NO** se usaran en el corriente práctico.
- En el costado derecho se agrupan los ajustes del barrido. Primero observamos en la figura 5c las distintas opciones de frecuencia, frecuencia central, span<sup>2</sup>, Luego tiene las opciones de full span y la de Zero Span<sup>3</sup>.
- Siguiendo observamos los controles de amplitud, en el cual aparece el Ref Level y los dB por división, los cuales debemos ajustar para mejorar la sensibilidad y la captura de nuestra imagen.
- Luego tenemos las opciones de ancho de banda en la figura 5d, tener en cuenta que las opciones de *Auto RBW* y *Auto VBW* tienen que estar desactivadas. Los valores posibles del RBW y del VBW **están atados al span seleccionado**.

<sup>1</sup>Tener en cuenta esta opción cuando se desee medir la densidad espectral de ruido

<sup>2</sup>Que es la frecuencia de stop menos la de start, por ende el ancho del barrido que se mostrará en pantalla

<sup>3</sup>Este método se utilizará para medir en la subsección de modulación en amplitud

Traces

Trace: One

Type: Clear & Write

Avg Count: 10

Color: [Black]

Update: ☒

Hide: ☐

Export Clear

(a) Menú de traces

Markers

Marker: One

Type: Normal

Place On: Trace One

Set Freq: 1.000000 MHz

Update: ☒

Active: ☐

Pk Tracking: ☐

Pk Threshold: -100.000 dBm

Pk Excurs.: 6.00 dB

Peak Search Delta

To Center To Ref

Peak Left Peak Right

(b) Menú de marcadores

Frequency

Center: 2.200050 GHz

Span: 4.399900 GHz

Start: 100.000000 kHz

Stop: 4.400000 GHz

Step: 20.000000 MHz

Full Span Zero Span

(c) Menú de frecuencia

Bandwidth

RBW Shape: Flat Top

RBW: 100.000000 kHz

VBW: 100.000000 kHz

Auto RBW: ☐

Auto VBW: ☐

(d) Menú de ancho de Banda

Figura 5: Opciones del software Spike

Por último veremos el análisis de lo que se muestra en pantalla:

- Arriba a la izquierda el nivel de referencia.
- Debajo del mismo tenemos los dB por división.
- Al medio arriba tendremos el RBW.
- A la derecha arriba el valor del VBW seleccionado.
- Debajo a la izquierda se observa el valor de la frecuencia de start.

- Al centro se observan la frecuencia central y el span seleccionado.
- A la derecha debajo de la imagen del barrido tendremos la frecuencia de stop y el valor del sweep time.

El primer paso para configurar una medición de espectro es decidir el rango de frecuencias de interés. Esto generalmente depende de las señales del dispositivo bajo prueba (DUT) o del rango de espectro que se está monitoreando. El ancho de banda de medición, o rango de frecuencias desde el inicio hasta el ajuste de parada, puede ser cualquier rango dentro del rango de frecuencia de operación de la analizador de espectro. Si el ancho de banda de medición está más allá del ancho de banda instantáneo, habrá un retraso en la actualización de la información de la señal, ya que el instrumento barre el rango de ancho de banda de medición más grande. El ancho de banda de medición se puede configurar especificando una frecuencia de inicio y parada, o la frecuencia central y el intervalo. Este ancho de banda se conoce como **SPAN**, matemáticamente es  $f_{max} - f_{min}$ .

## 2.1. Ancho de Banda de Resolución (RBW) y Ancho de banda de video

El ancho de banda de resolución es esencialmente el ancho de banda del filtro de banda estrecha fijo, que es el último de la cadena de filtrado del analizador de espectro. Los valores no pueden seleccionarse de un rango continuo de RBW, solo hay una selección finita disponible.

El ancho de banda de resolución determina qué tan cerca pueden estar los componentes de frecuencia en el espectro de la señal y aún se pueden mostrar como componentes distintos en la pantalla.

El Ancho de Banda de Video (VBW) es básicamente un filtro de suavizado con un ancho de banda igual al RBW. VBW esencialmente reduce el ruido que se muestra, haciendo que los niveles de potencia sean más fáciles de ver. El control de barrido generalmente es controlado por el analizador de espectro.

Dependiendo de la complejidad y resolución necesarias para detectar las señales y frecuencias de interés, el RBW se puede ajustar para poder observar los detalles de las potencias de la señal en tonos distintos. Los RBW más bajos proporcionan barridos más detallados con un piso de ruido más bajo, a costa de una velocidad de barrido más lenta, mientras que los RBW más grandes proporcionan barridos más rápidos y menos detallados. Además de RBW, el VBW puede usarse para revelar información de señal que puede estar oculta por el ruido en el sistema. Reducir el VBW actúa como un filtro de paso bajo, suavizando las variaciones de amplitud de la señal y el ruido de fondo.

El grado de suavizado es una relación del ancho de banda de video a resolución. Al igual que con RBW, los VBW más bajos aumentan el tiempo de barrido. Las configuraciones RBW y VBW son especialmente importantes cuando se miden señales de onda continua de bajo nivel (CW) en presencia de una señal grande, como espuelas de un bucle bloqueado en fase (PLL) o productos de intermodulación. Al disminuir RBW para colocar el ruido de fondo, al menos 10 dB por debajo de la señal de interés, y luego disminuir VBW para suavizar el ruido restante, estas señales se miden fácilmente.

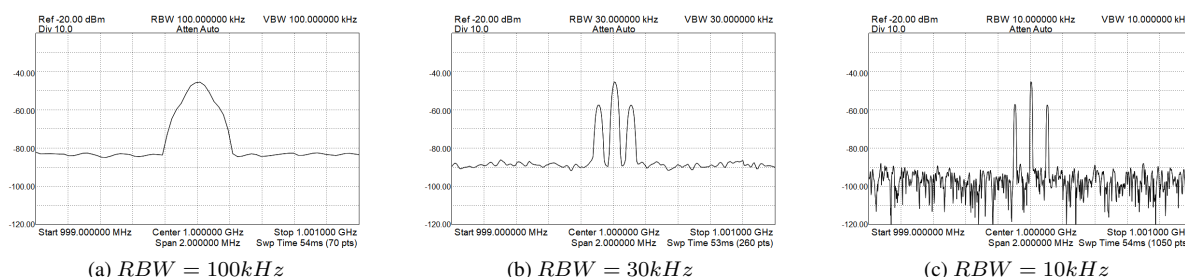


Figura 6: Diferentes valores de RBW para una señal AM

En la figura 6 se puede observar una señal de AM centrada en  $1\text{GHz}$  con bandas laterales a  $100\text{kHz}$ . Se arranca en un valor de RBW grande (figura 6a) y se va disminuyendo (angostando) la frecuencia de este filtro, se puede observar como aparecen las componentes de las bandas laterales.

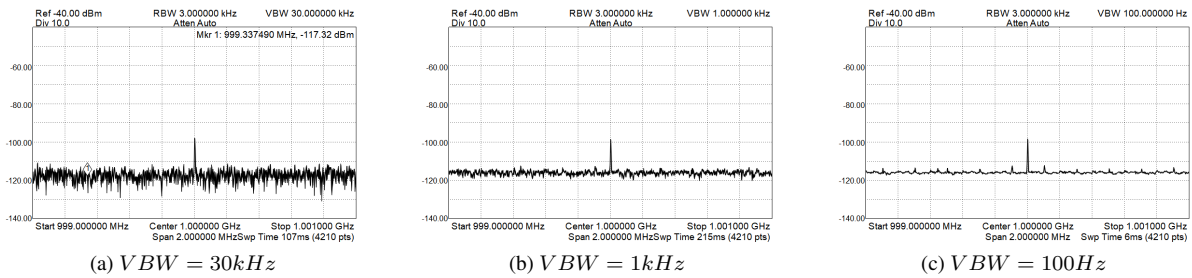


Figura 7: Diferentes valores de VBW para una señal AM

Mientras que en la figura 7 se observa como afecta el filtro de video a una señal, se ha disminuido la potencia de la portadora para que este más cercana al piso de ruido del equipo. En la primer parte se observa mayor amplitud de ruido figura 7a, esto va disminuyendo. Se puede ver como mientras más pequeño es el valor de VBW y de RBW se toman más muestras en la medición (puntos), a su vez aumenta el tiempo de barrido.

## 2.2. Tiempo de Barrido

En inglés conocido como sweep time (ST) es el tiempo de un ciclo completo de la gama de frecuencia seleccionada. Debe ser adaptado a los parámetros como RBW, VBW y Span, ya que los filtros de FI poseen un tiempo finito de estabilización de respuesta.

En los analizadores de espectro debe mantenerse la siguiente relación:

$$K = \frac{10 * Span}{(RBW^2 * ST)}$$

Siendo:

- $K = 1$  produce un error del 10 %, que es la condición límite.
- $K = 0,1$  el error es despreciable.

En este instrumento el sweep time se acomoda automaticamente y no puede ser configurado. Pero es necesario conocer esta relación para saber si la medición es correcta.

Por ejemplo, si:

- $RBW = 3\text{kHz}$
- $ST = 1\text{seg}$
- $SPAN = 100\text{kHz}$

Nos da un  $K = 0,11$  por lo que se puede considerar correcto. En caso que  $K$  sea  $\geq 1$  se produce el error de estabilización. En los analizadores antiguos se podía acoplar mecánicamente entre el Span y el RBW para tener siempre una relación adecuada, ya que ambos controles estaban concéntricos en la misma llave selectora. En los modernos digitales existe una función llamada “couple” la cual cumple con la misma función (modo automático).

El error de estabilización es un error producido por un barrido demasiado rápido en la gama de frecuencia seleccionada, lo que impide una estabilización suficiente en la respuesta de los filtros selectores. En la figura 8 se observa un ejemplo de diferentes valores de  $K$ .

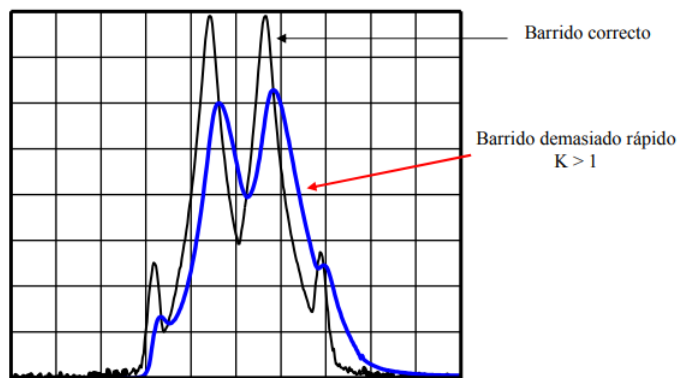


Figura 8: Valor de  $K$  para diferentes sweep time

### 2.3. Ganancia, ganancia IF, atenuación RF y nivel de potencia

Dependiendo del nivel de potencia de una señal, la intensidad de la señal puede influir en muchos ajustes internos de un analizador de espectro. Estas configuraciones incluyen la ganancia de frecuencia intermedia (IF), el nivel del atenuador de RF, la ganancia de RF y el nivel de potencia de la pantalla. El primer componente que encuentra una señal cuando ingresa a un analizador de espectro es el atenuador de RF. Esta configuración se puede aumentar para medir señales de RF de alta potencia y mejorar la linealidad, o disminuir, para mejorar la sensibilidad a las señales de bajo nivel.

Además, después del atenuador de RF, se puede usar un preamplificador de RF para aumentar la sensibilidad de las señales de baja potencia. Esto también disminuirá la linealidad de la entrada del analizador, dando como resultado productos de intermodulación más altos y reduciendo la amplitud del nivel máximo de señal que se puede medir con precisión. Generalmente, un compromiso entre sensibilidad y linealidad es lo mejor. El software Spike selecciona automáticamente la configuración del atenuador y el amplificador de acuerdo con el nivel de referencia seleccionado, seleccionando un compromiso entre linealidad y sensibilidad para optimizar el rango dinámico para una señal de  $0 - 20dB$  por debajo del nivel de referencia.

Además, después de las etapas del mezclador del convertidor descendente, los amplificadores controlados por la configuración de ganancia IF pueden usarse para aumentar o disminuir la intensidad de la señal de las frecuencias dentro del ancho de banda de interés. Una vez más, el software Spike controlará automáticamente esta configuración.



## 2.4. Modo Span Cero

En los viejos tiempos, un analizador de espectro mostraba potencia versus frecuencia barriendo un oscilador local (LO) para que la señal de RF pasara a través de un filtro de ancho de banda de resolución analógica (RBW). En esencia, la visualización del espectro era simplemente una serie de mediciones de potencia medidas en un rango de frecuencias.

Es un modo de analizador de espectro en el que el oscilador local (LO) no barre. El LO del analizador de espectro permanece fijo a una frecuencia dada, por lo que el analizador se convierte en un receptor sintonizado fijo. El ancho de banda del receptor es el del ancho de banda de resolución (IF). En caso de un intervalo cero, las variaciones de amplitud de señal (o potencia) se muestran en función del tiempo.

Para evitar cualquier pérdida de información de la señal, el ancho de banda de resolución debe ser tan amplio como el ancho de banda de la señal. Para evitar cualquier suavización, el ancho de banda de video debe establecerse más ancho que el ancho de banda de resolución.

Podemos obtener algunas características importantes del método mediante el cual los analizadores de espectro históricamente produjeron su visualización. Primero, tenga en cuenta que, por naturaleza del oscilador local que se extiende por la banda de interés (figura 9, el instrumento determina cada línea espectral (una medida de potencia) en diferentes puntos en el tiempo.

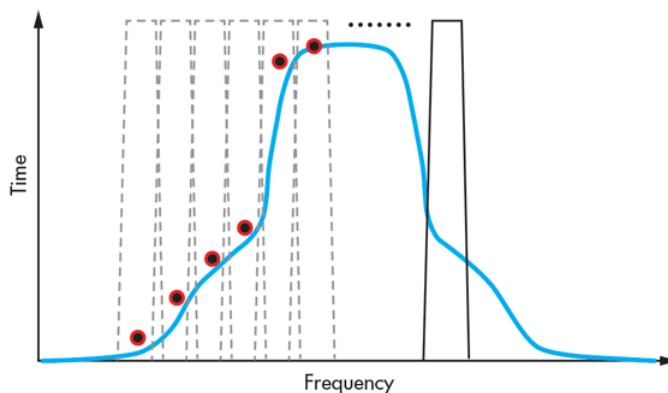


Figura 9: Barrido de un oscilador local y medición de potencias

En segundo lugar, la potencia medida en cada punto está determinada fundamentalmente por las características del filtro de ancho de banda de resolución analógica (RBW). Al medir el ruido de fondo del instrumento, un filtro de banda estrecha (es decir, un ancho de banda de resolución estrecho) dará como resultado una menor potencia en cada contenedor y un filtro de banda ancha dará como resultado una mayor potencia integrada. Tenga en cuenta que, por esta razón, el ruido de fondo del analizador de señal se representa en dBm / Hz para tener en cuenta el ancho de banda de integración.

Para usar un analizador de señal de RF en modo de "span cero", uno simplemente ingresa 0Hz como valor de span, en spike hay un método más fácil que es poner en *AnalysisMode* - > *ZeroSpan* y se puede ver la imagen de la figura 10. En un analizador de espectro tradicional, el instrumento dejaría de barrer el LO y el filtro de ancho de banda de resolución analógica estaría esencialmente "estacionado" a una frecuencia fija. Luego, en lugar de mostrar la potencia en función de la frecuencia, el instrumento mostrará la potencia (a través del ancho de banda integrado del filtro) en función del tiempo.

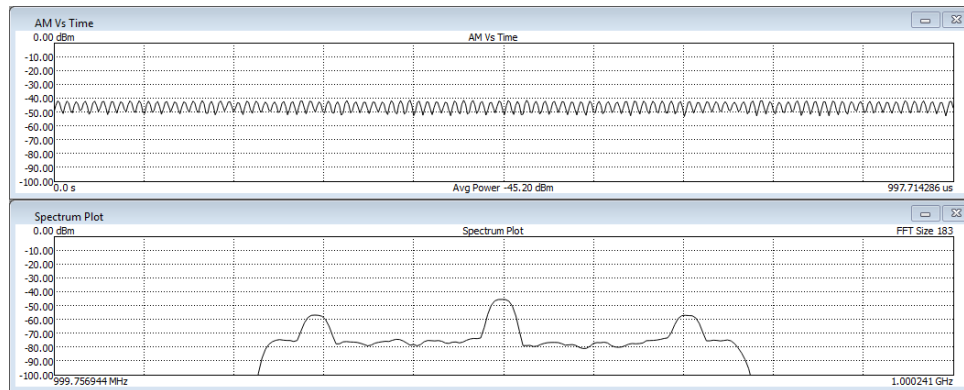


Figura 10: Método de Span Cero en Spike

Usos del span cero:

- Se usa para medir el ruido y las mediciones similares al ruido donde el ancho de banda del ruido es mucho mayor que el RBW, como en la medición de la densidad espectral de potencia.
- Se puede usar para determinar los niveles de activación apropiados en una medición de espectro controlado.
- La potencia portadora de un transmisor se mide con el analizador de espectro en un intervalo cero.
- Para realizar un análisis de activación y de compuerta si la potencia de la portadora se va a medir en una parte específica de una señal de ráfaga de RF.

## 2.5. Ruido

En el analizador de espectro se puede analizar el ruido de diferentes formas. El ruido afecta el rendimiento de los parámetros en los analizadores de espectro, como la sensibilidad, el rango dinámico, la detección promedio, los errores de la relación señal/ruido.

En la mayoría de los casos, tomamos un analizador de espectro como receptor, el ruido no está directamente presente en el instrumento, sino como parte del resultado de la medición.

El Nivel de ruido promedio (DANL en inglés) visualizado es una medida utilizada para definir la sensibilidad de un analizador de espectro, este especifica todo el ruido interno del instrumento referenciado a  $1\text{ Hz}$  y se representa en  $[\text{dBm}/\text{Hz}]$ . El DANL depende de la frecuencia y aumenta con la misma, los analizadores utilizan preamplificadores para reducir este parámetro. No se puede medir ninguna señal de entrada que esté por debajo de este nivel.

El DANL no representa el nivel de ruido real de la señal de entrada, este se ve a la salida en la pantalla sumado al ruido que el instrumento agrega. Con un promedio adecuado (RBW/VBW), se muestra un piso de ruido en la pantalla. De hecho, todas las pantallas de medición del analizador de espectro son el resultado de la señal de entrada más el ruido interno.

Además de todo esto, una de las fuentes de ruido importantes se llama ruido térmico”, esta solo relacionado con la temperatura y no con la frecuencia ni la impedancia. Este ruido no se puede eliminar y a temperatura ambiente 27 grados este vale  $-174\text{ dBm}$ .

$$\text{DANL } \text{dBm}/\text{Hz} = -174\text{ dBm}/\text{Hz} + NF_{SA} - 2,51\text{ dB}$$

Esta es la ecuación para calcular el DANL, El registro de potencia promedio reduce el ruido mostrado en 2, 51dB (Puede variar dependiendo la empresa que desarrolla el instrumento). Mientras que si se usa el promediado de raíz cuadrada, rms o el promedio este valor no se agrega a la fórmula.  $NF_{SA}$  es el factor de ruido del analizador de espectro.

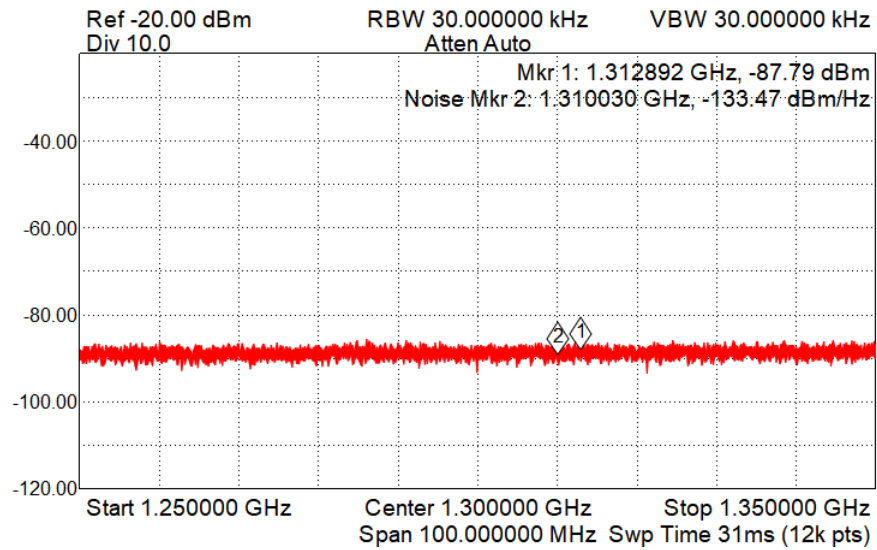
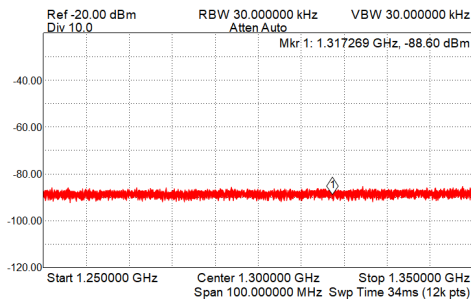


Figura 11: Diferencia entre piso de ruido y nivel de ruido promedio.

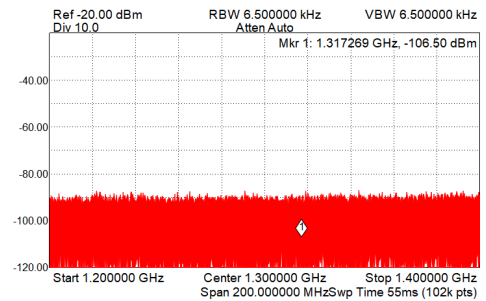
En la figura 11 se puede observar la diferencia entre piso de ruido y nivel de ruido promedio. A su vez se puede extraer la información para calcular el factor de ruido de la siguiente forma:

$$NF_{SA} = -133,47dBm/Hz + 174dBm/Hz + 2,51dB = 43,04$$

Esto nos da la degradación de la relación señal ruido de un dispositivo, relacionando la salida con la entrada. Se recuerda con el siguiente ejemplo que el piso de ruido disminuye cuando se achica el RBW figura 12.



(a) Piso de ruido con  $RBW = 30kHz$



(b) Piso de ruido con  $RBW = 6,5kHz$

Figura 12: Diferentes valores de piso de ruido al variar RBW.

### 3. Tipos de Modulaciones

#### 3.1. Modulación AM / FM

La modulación en amplitud se ha visto en varias materias a lo largo de la carrera, a modo de repaso se tiene que es creada mediante la multiplicación de la amplitud de una onda senoidal por la señal que tiene el mensaje.

$$y(t) = m(t)c(t)$$

$$y(t) = A_c m(t) \cos(2\pi f_c t + \phi_0)$$

La señal modulada se puede ver en la figura 13, se puede observar esta forma de onda en la envuelta. Mientras que en la figura 14 se percibe en la envuelta que la señal modulante es digital.

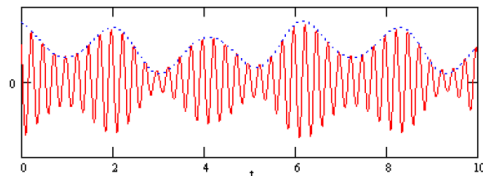


Figura 13: Portadora modulada en amplitud con una señal analógica.

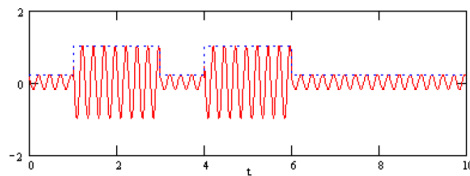


Figura 14: Portadora modulada en amplitud con una señal digital.

En el dominio del tiempo se observan de esa manera, mientras que en el dominio de la frecuencia al ser medidas con un analizador de espectro de barrido se ve como la figura 15. Esta señal tiene una portadora de  $1GHz$  y una modulante analógica senoidal de  $10MHz$ , los demás controles del analizador se observan en la figura.

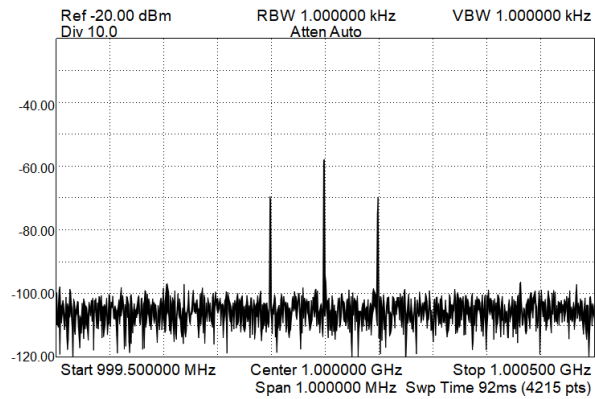


Figura 15: Señal modulada en amplitud por una señal analogica observada en un analizador de espectro de barrido.

Por otro lado se sabe que la transformada de fourier de una señal cuadrada tiene la forma vista en la figura 16. Entonces cuando esta señal modula a una señal senoidal se produce lo que se observa en la figura 17. Con flechas rojas se señalan las componentes producidas.

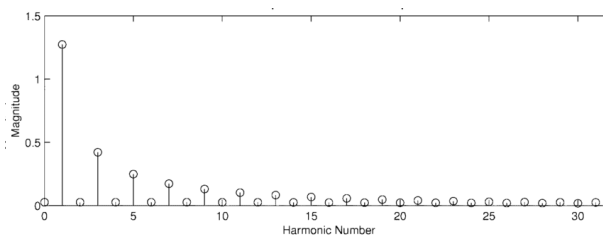


Figura 16: Transformada de fourier de una señal cuadrada.

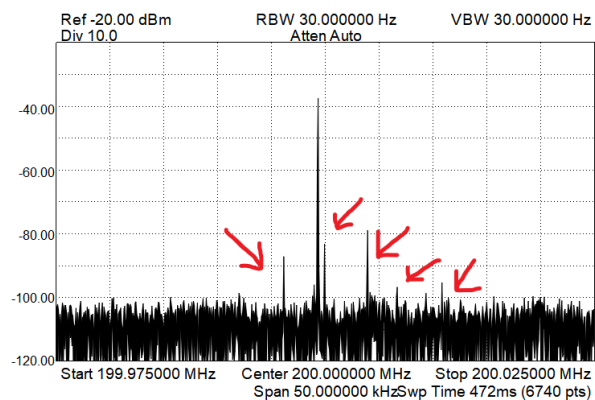


Figura 17: Señal modulada en amplitud por una señal digital observada en un analizador de espectro de barrido.

Repasando, las opciones que nos provee el generador para realizar una modulación en amplitud son la frecuencia de la portadora, la frecuencia de la modulante, el índice de modulación y la forma de onda de esta última. Se puede ver en la figura 18

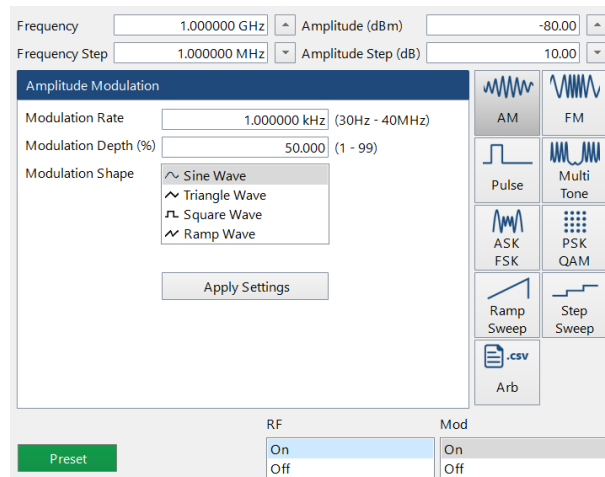


Figura 18: Pantalla y opciones del generador para una señal am.

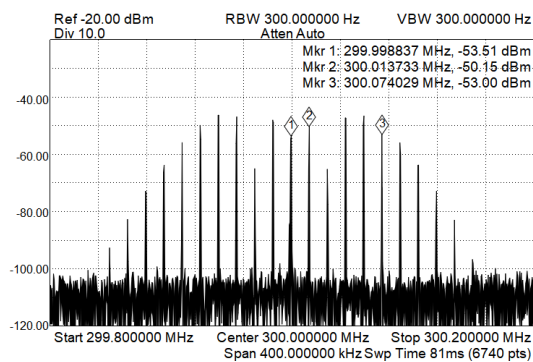
Otra de las modulaciones comúnmente vistas en la carrera, es cuando se modula en frecuencia, sin entrar en muchos detalles teóricos se tiene que el generador permite las mismas opciones que para AM, estas son la frecuencia de la portadora, la frecuencia de la modulante ( $f_m$ ), la desviación por frecuencia ( $\Delta f$ ) y la forma de onda de la modulante (aunque solo prestaremos atención al caso de que es una senoidal). Tenemos que el índice de modulación sigue la formula

$$m = \frac{\Delta f}{f_m}$$

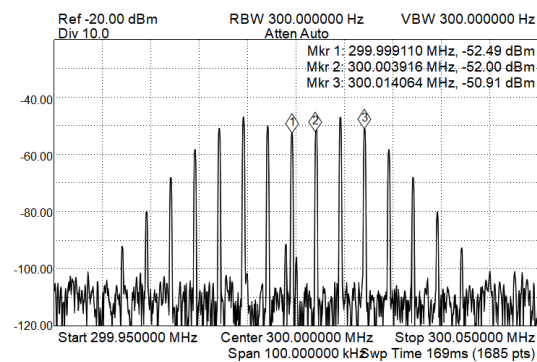
El ancho de banda se puede obtener mediante carson con la formula

$$BW = 2(\Delta f + f_m)$$

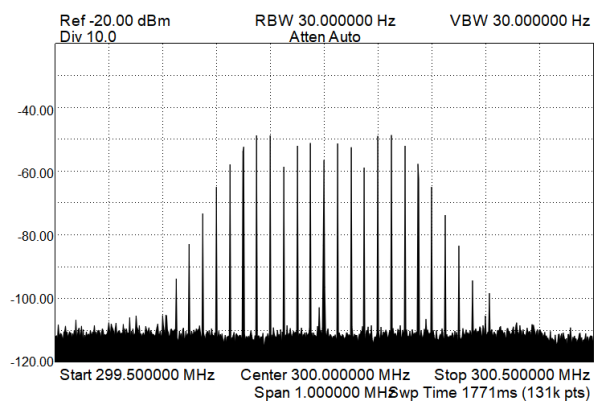
Visualmente la desviación por frecuencia se encuentra en el último pico de  $-3dB$  del espectro, luego de este pico empiezan a caer las componentes y no es información utilizable. El caso más común es cuando  $\Delta f = 75kHz$  y  $f_m = 15kHz$  como se observa en la figura 19a donde el marcador uno es la frecuencia de la portadora, el marcador 2 la  $f_m$  y el marcador 3 la  $\Delta f$ . Viendo esto, cual es la información que se puede extraer de la figura 19c.



(a)  $\Delta f = 75 \text{ kHz}$  y  $f_m = 15 \text{ kHz}$



(b)  $\Delta f = 15 \text{ kHz}$  y  $f_m = 5 \text{ kHz}$



(c) Otra modulación en frecuencia

Figura 19: Distintas modulaciones en frecuencia

La pantalla del generador se puede observar en la figura 20.

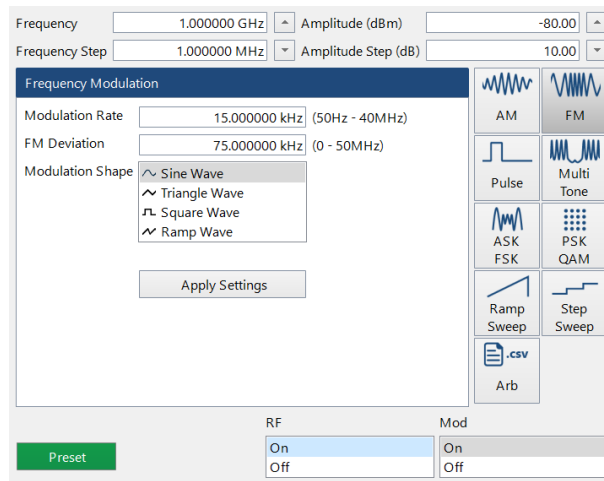
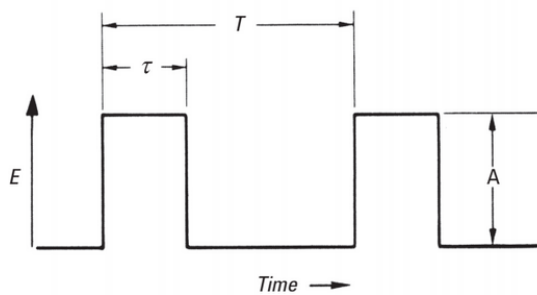


Figura 20: Pantalla y opciones del generador para una señal fm.

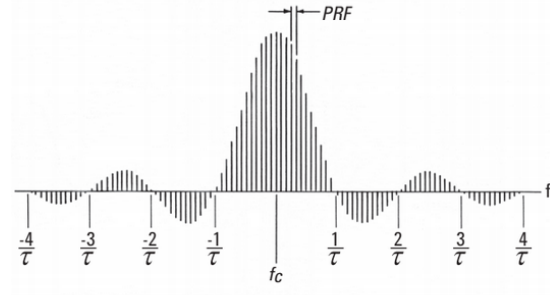
### 3.2. Modulación por pulsos

El analizador de espectro fue originalmente diseñado para observar la salida de los transmisores de radar. La señal del radar es un tren de pulsos de RF con una frecuencia de repetición constante, ancho y forma de pulso constante y amplitud constante. Al observar los espectros característicos, las propiedades más importantes de la señal pulsada, como el ancho de pulso, el ancho de banda ocupado, el ciclo de trabajo y la potencia máxima y media, se pueden medir fácilmente y con alta precisión.

La modulación de amplitud de pulso (PAM), es una forma de modulación de señal donde la información del mensaje se codifica en la amplitud de una serie de pulsos de señal. Es un esquema de modulación de pulso analógico en el que las amplitudes de un tren de pulsos portadores varían según el valor de muestra de la señal de mensaje. La demodulación se realiza detectando el nivel de amplitud de la portadora en cada período.



(a) Tren de pulsos periódico.



(b) Espectro de una portadora modulada con un pulso rectangular

Figura 21: Modulación de pulsos



Se tiene un tren de pulsos rectangular perfecto como se muestra en la figura 21a, se considera perfecto por que el tiempo de subida es cero y no hay sobreimpulsos. Este pulso se muestra en el dominio del tiempo, mientras que la gráfica espectral de esta señal se observa en la figura 21b. Sobre esta figura se puede decir que las líneas individuales representan el producto de modulación de la portadora y la frecuencia de repetición de pulso modulante con sus armónicos. Por lo tanto las líneas estarán espaciadas en frecuencia por cualquiera que sea la frecuencia de repetición de pulso. Siendo  $F_L = F_C \pm nPRF$  la separación de las líneas.

El lóbulo principal en el centro y los lóbulos laterales se muestran como grupos de líneas espectrales que se extienden por encima y debajo de la línea de base. El lóbulo principal contiene la frecuencia de la portadora representada por la línea espectral más larga en el centro. La amplitud de las líneas espectrales que forman los lóbulos varía en función de la frecuencia de acuerdo con la expresión para un pulso perfectamente rectangular

$$\frac{\sin\left(\omega\frac{\tau}{2}\right)}{\omega\frac{\tau}{2}}$$

Por lo tanto, para una frecuencia de portadora dada, los puntos donde estas líneas pasara por la amplitud cero están determinadas únicamente por el ancho de pulso de modulación.

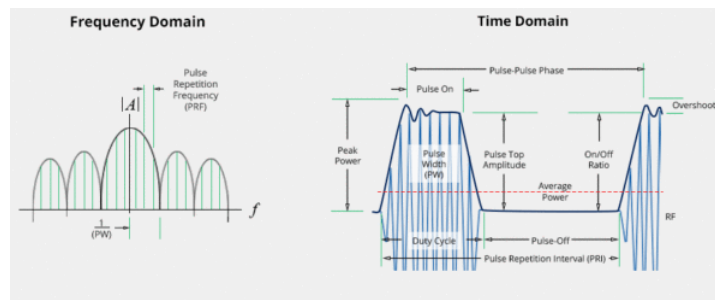


Figura 22: Señal de pulsos en el dominio del tiempo y en el dominio de frecuencia.

### 3.2.1. Línea Espectral

Se produce una línea espectral cuando el RBW es estrecho en comparación con el espaciado de frecuencia de los componentes de la señal de entrada. Debido a que los componentes están espaciados en la frecuencia de repetición de pulso, se puede decir que todas las componentes de frecuencia individuales pueden resolverse. Solo uno está dentro del ancho de banda a la vez como se puede ver en la figura ?? y se define:

1. El espacio entre líneas no cambiará cuando se cambie el tiempo de barrido.
2. La amplitud de cada línea no cuando se cambie la banda RBW siempre que este permanezca por debajo del PRF.

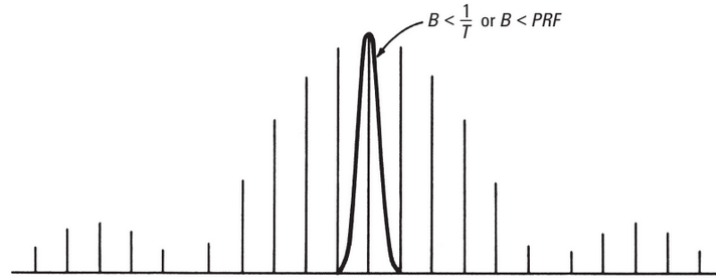


Figura 23: Ancho de banda de resolución menor a la frecuencia de repetición de pulsos.

A continuación se verán imágenes de una señal de RF pulsada para ver cómo diferentes tiempos de barrido, span y RBW del analizador de espectro influyen en la señal. Una señal portadora con una amplitud de  $-30dBm$  24a es modulada con un tren de pulsos de  $1KHz$  y un ancho de pulso de  $0,1ms$  (figura 24b donde el  $RBW = 100Hz$ ).

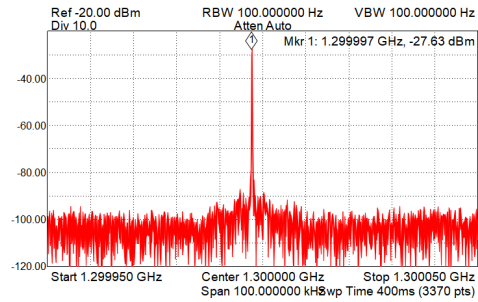
En la figura 24c se modifica el  $RBW$  a  $300Hz$ , aunque la resolución de las líneas espectrales se reduce todavía se pueden diferenciar. De esta experiencia podemos derivar una regla general para el ancho de banda del analizador  $RBW < 0,3PRF$ , preferente  $RBW < 0,1PRF$ .

En la figura 24d se modifica el span de  $100kHz$  a  $50kHz$ , se puede percibir que la envolvente del espectro a cambiado y el espacio entre líneas también, mientras que el número de líneas de cada lóbulo permanece constante.

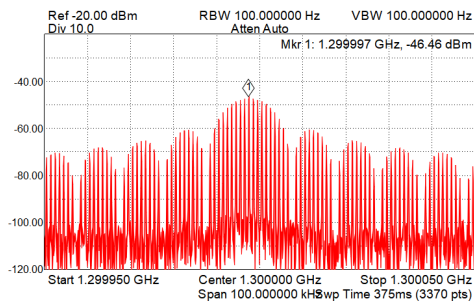
Por otro lado, en la figura 24e se modifica el ancho del pulso de la señal modulante. Al comparar con la figura 24b se encuentran tres diferencias:

1. Los mínimos del lóbulo lateral están separados por  $20kHz$ .
2. El número de líneas en cada lóbulo lateral es 20. (El espacio entre líneas sigue siendo de  $1kHz$  ya que no se cambio el PRF).
3. La amplitud de la envolvente del espectro es  $6dB$  menor

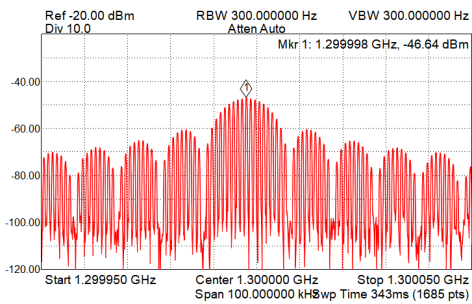
El último punto revela un detalle muy importante, la amplitud de la componente de la portadora de un pulso modulado se ve afectado por el ancho del pulso. Este efecto se llama desensibilización de pulso y esta dado por el factor de  $\alpha_L[dB] = 20\log(\tau PRF)$ .



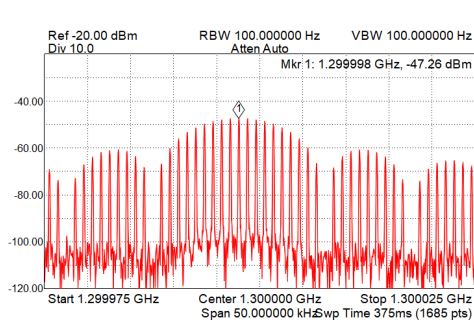
(a) Portadora sin modular a  $1,3GHz$ .



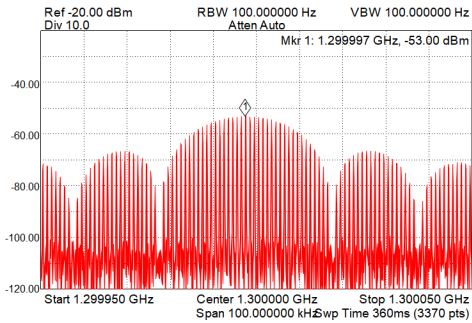
(b) Línea espectral con  $RBW = 100Hz$



(c) Línea espectral con  $RBW = 300Hz$



(d) Línea espectral con  $RBW = 100Hz$  y  $Span = 50KHz$



(e) Ancho de pulso en  $0,05ms$

Figura 24: Modificaciones de la líneas espectrales

El hecho de que la amplitud de las líneas espectrales en los mínimos del lóbulo alcance cero para cada relación de enteros puede usarse para ajustar el ciclo de trabajo con mucha precisión.

### 3.2.2. Pulso Espectral

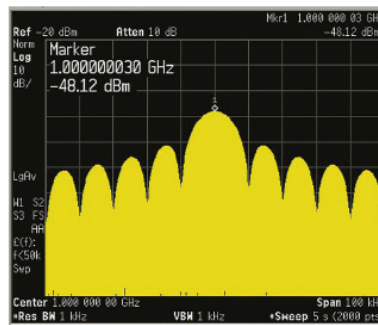
El espacio entre las líneas impulsivas no varía cuando cambia el span. Varía horizontalmente el espectro de las envolventes. Si se mide el espacio entre los pulsos se encuentran espaciados en tiempo real. La forma de la envolvente no varía con la velocidad de barrido.

Un pulso espectral se produce cuando el RBW es igual o mayor que el PRF. En este caso el instrumento no puede resolver las componentes individuales en el dominio de frecuencia. La visualización resultante no es real”, si no una combinación de visualización de tiempo y frecuencia. Se dice que esta en el dominio del tiempo debido a que cada línea se muestra cuando se produce un pulso, independientemente de la frecuencia a la que este sintonizado el analizador.

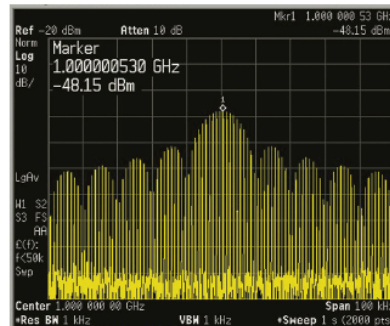
La pantalla tiene tres características distintivas:

1. El espacio entre las líneas de pulso y su número cambiará cuando cambie el tiempo de barrido del analizador. Las líneas están espaciadas en tiempo real por  $\frac{1}{PRF}$ . La forma del sobre del espectro no cambiará con el tiempo de exploración.
2. El espacio entre las líneas no cambiará cuando se cambie el tramo. La envolvente del espectro cambiará horizontalmente.
3. La amplitud de la envolvente de la pantalla aumentará linealmente a medida que aumente el RBW. Esto significa un aumento de amplitud de  $6dB$  para duplicar RBW.

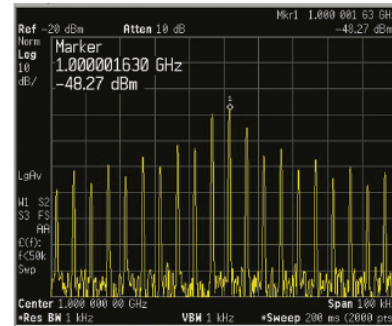
Esto es cierto siempre que RBW no exceda de 0,2. Cuando el ancho de banda  $\tau$  es igual a 1 o  $\frac{1}{2}$  del ancho del lóbulo principal. La amplitud de  $\tau$  de la pantalla es prácticamente la amplitud máxima de la señal. El filtro IF cubre casi todos los componentes espectrales significativos. Pero hemos perdido la capacidad de resolver la envolvente.



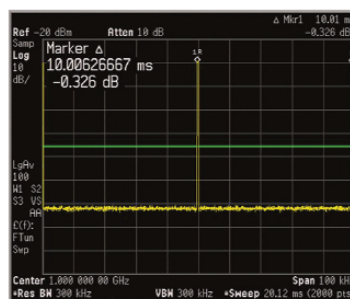
(a)  $PRF=100Hz$ , ancho de pulso =  $0,1ms$ , span=  $100kHz$ , sweep time =  $10s$ , RBW =  $1kHz$ ..



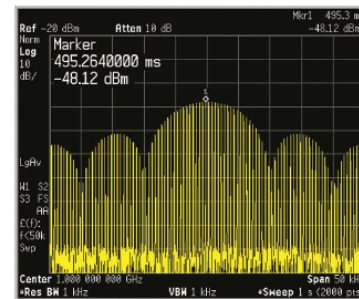
(b) sweep time reducido a  $1s$



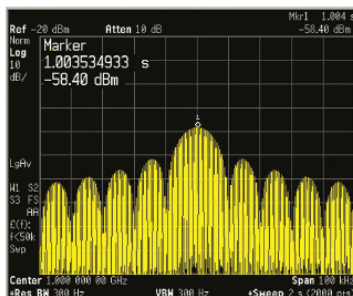
(c) sweep time reducido a  $200ms$



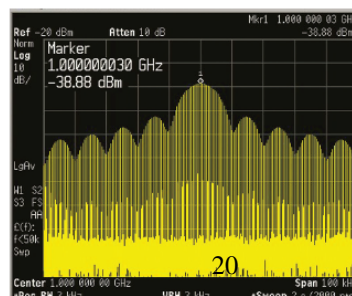
(d) RBW= $300kHz$  y sweep time =  $20ms$



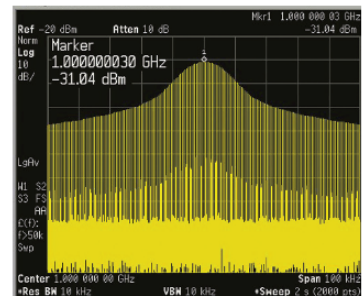
(e) Span a  $50kHz$ , RBW a  $1kHz$  y sweep time  $1s$



(f) Span a  $100kHz$ , RBW a  $300kHz$  y sweep time  $2s$



(g) RBW a  $3kHz$



(h) RBW a  $10kHz$

Figura 25: Modificaciones de los pulsos espectrales

Las características de los pulsos espectrales se ven en la figura 25, se debe utilizar otro analizador de espectros ya que en el software spike no se puede modificar el valor de sweep time.

En la figura 25a se modula la portadora mediante un tren de pulsos con un  $PRF = 100Hz$ , el  $RBW = 1kHz$  es decir podemos ver la envuelta del espectro con el lóbulo principal y los lóbulos laterales y los mínimos en el medio. Las líneas que forman la envuelta no son líneas espectrales, sino líneas de pulso en el dominio del tiempo.

Se puede verificar esto cambiando el sweep time (figura 25b). Si se reduce aún más el sweep time, se pierde información sobre la forma de la envuelta del espectro. Es decir, la información del dominio de la frecuencia. Pero ahora se puede medir fácilmente el PRF en el tiempo (figura 25c y figura 25d).

En la figura 25e cambiamos el span a  $50kHz$ . El sweep time es el mismo de la figura 25b. Se puede ver que la envuelta del espectro cambió (dominio de la frecuencia), pero el espacio entre líneas permanece constante (dominio del tiempo).

En la figura 25f se configura el RBW en  $300Hz$ , se puede medir la disminución de la amplitud de aproximadamente  $10dB$  en comparación con la figura 25a, que muestra la relación lineal entre RBW y la amplitud de la pantalla. También se puede ver que los mínimos están mejor resueltos que en la figura 25a.

En la figura 25g, el RBW se incrementa a  $3kHz$ . El aumento de la amplitud de la pantalla en comparación con la figura 25f no es de  $20dB$  si no de  $18dB$ , se ha perdido la relación lineal debido a que RBW es mayor que  $\frac{0,2}{\tau_{eff}}$ .

Además la resolución de los lóbulos laterales se pierde en gran medida. Si se aumenta RBW a  $10kHz$  que es igual a  $\tau_{eff}$ , se obtiene una pantalla con una amplitud prácticamente igual a la amplitud máxima de la señal pulsada (figura 25h).

Algunas reglas generales adicionales son importantes:

1. Para una resolución suficiente de la envuelta del espectro, el ancho de banda de resolución debe ser inferior al 5 % del ancho de banda del lóbulo principal  $RBW < \frac{0,1}{\tau_{eff}}$  o para una resolución mejor de los lóbulos mínimos se debe usar  $RBW < \frac{0,03}{\tau_{eff}}$ .
2. El sistema debe responder a cada pulso de forma independiente. Los efectos de un pulso deben decaer antes de que ocurra el siguiente pulso. La constante de tiempo de disminución del amplificador de IF es aproximadamente  $\frac{0,3}{RBW}$ . Una disminución del efecto del pulso hasta el 1 % ( $-40dB$ ) requiere de cinco constantes de tiempo, esto lleva a la regla  $RBW > 1,5PRF$ , sin embargo se obtiene un error de menos de  $1dB$  si  $RBW = PRF$ .
3. El rango entre  $PRF > RBW > 0,3PRF$  (línea espectral) muestra propiedades de ambos tipos de respuesta (línea espectral y pulso espectral) y debe evitarse.
4. El número de líneas de pulso que forman la pantalla de la envuelta del espectro está determinado por el PRF y el sweep time. Para una pantalla con resolución útil, es decir, un número suficiente de líneas el sweep time debe ser de  $sweep\_time[s/div] \geq \frac{10}{PRF[Hz]}$ .

Las opciones que provee el generador se pueden ver en la figura 26

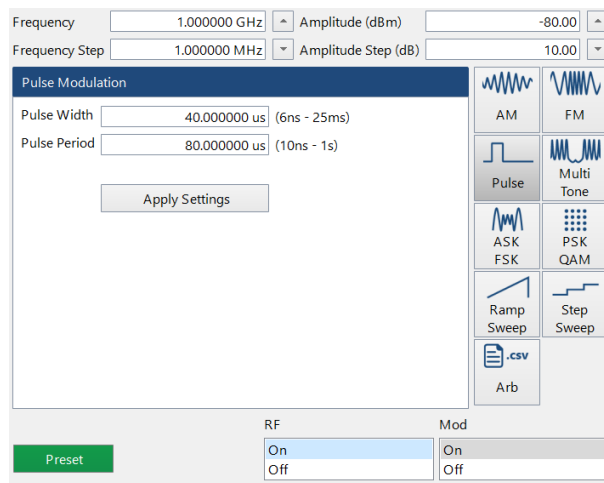


Figura 26: Pantalla y opciones del generador para una señal modulada con un pulso.

### 3.3. Modulaciones digitales

En esencia las modulaciones digitales constan en el procesamiento de algunos parámetros de una onda portadora en función a otra señal conocida generalmente como onda moduladora la cual es una señal digital binaria (de 1 y 0) que porta la información, para que la misma sea transmitida por un canal. Dentro de este tipo de modulaciones se pueden considerar entre las más resaltantes ASK, FSK y PSK para los sistemas de comunicación digitales.

#### 3.3.1. Modulación por desplazamiento de amplitud ASK

Es una forma de modulación de amplitud que representa datos digitales como variaciones en la amplitud de una onda portadora. En un sistema ASK, el símbolo binario 1 se representa transmitiendo una onda portadora de amplitud fija y una frecuencia fija durante un bit de  $T$  segundos. Si el valor de la señal es 1, se transmitirá la señal portadora; de lo contrario, se transmitirá un valor de señal de 0.

Cualquier esquema de modulación digital utiliza un número finito de señales distintas para representar datos digitales. ASK utiliza un número finito de amplitudes, cada una de ellas con un patrón único de dígitos binarios. Por lo general, cada amplitud codifica un número igual de bits. Cada patrón de bits forma el símbolo que está representado por la amplitud particular. El demodulador, que está diseñado específicamente para el conjunto de símbolos utilizado por el modulador, determina la amplitud de la señal recibida y la asigna de nuevo al símbolo que representa, recuperando así los datos originales. La frecuencia y la fase del portador se mantienen constantes.

Al igual que AM, un ASK también es lineal y sensible al ruido atmosférico, distorsiones, etc. Tanto los procesos de modulación como de demodulación ASK son relativamente económicos. La técnica ASK también se usa comúnmente para transmitir datos digitales a través de fibra óptica. Para los transmisores LED, el binario 1 está representado por un pulso corto de luz y el binario 0 por la ausencia de luz. Los transmisores láser normalmente tienen una corriente de "polarización" fija que hace que el dispositivo emita un bajo nivel de luz. Este nivel bajo representa 0 binario, mientras que una onda de luz de mayor amplitud representa 1 binario.

La forma más simple y más común de ASK funciona como un interruptor, utilizando la presencia de una onda portadora para indicar una binaria y su ausencia para indicar un cero binario. Este tipo de modulación se llama

incrustación de activación / desactivación (OOK), y se utiliza en frecuencias de radio para transmitir el código Morse (denominado operación de onda continua).

Se han desarrollado esquemas de codificación más sofisticados que representan datos en grupos que usan niveles de amplitud adicionales. Por ejemplo, un esquema de codificación de cuatro niveles puede representar dos bits con cada cambio de amplitud; un esquema de ocho niveles puede representar tres bits; y así. Estas formas de modulación por desplazamiento de amplitud requieren una alta relación señal-ruido para su recuperación, ya que, por su naturaleza, gran parte de la señal se transmite a potencia reducida.

En el dominio del tiempo se puede observar la figura 27, donde se puede ver el dato, luego la portadora. Mientras que después se ve las dos formas de modular más simples, la que funciona como un switch, y la ASK binario. Luego pueden ir apareciendo diferentes niveles de amplitud para poder enviar datos de más dígitos.

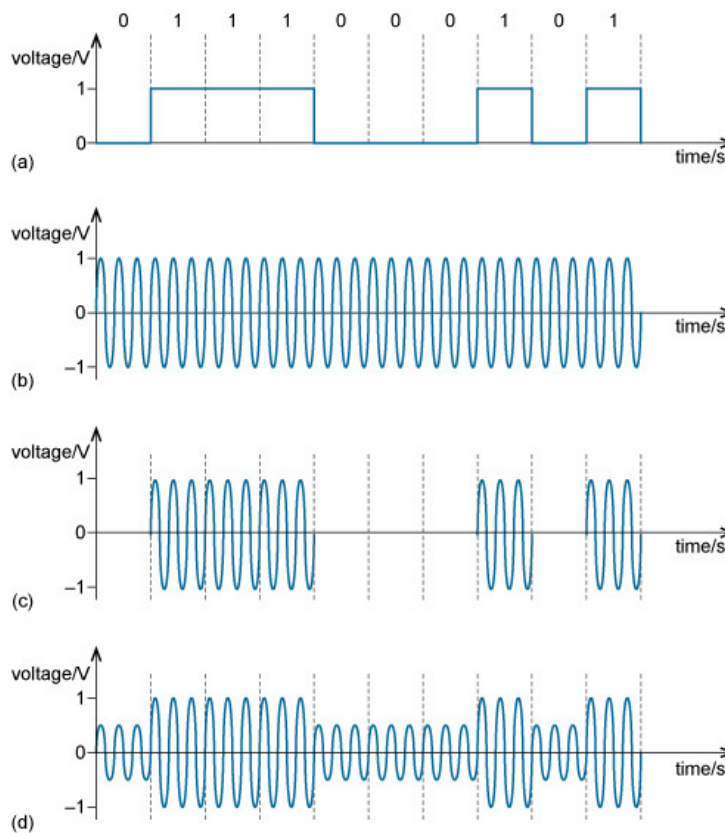
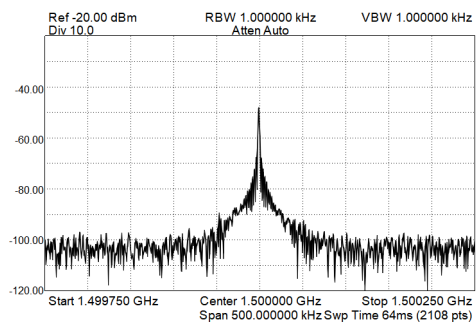


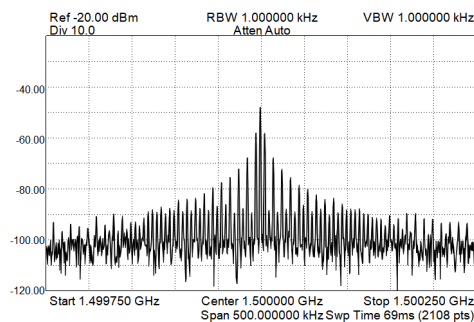
Figura 27: (a) Dato a transmitir (b) Portadora sin modular (c) On-Off Keying (OOK) (d) ASK Binario

Por el lado del dominio de la frecuencia, con el generador de funciones se pueden elegir el symbol rate que es el número de cambios de símbolo, cambios de forma de onda o eventos de señalización, a través del medio de transmisión por unidad de tiempo utilizando una señal modulada digitalmente o un código de línea. La velocidad de los símbolos se mide en baudios (Bd) o símbolos por segundo. En frecuencia significa elegir el ancho de banda que ocupa la comunicación, en la figura 28 se mantienen todos los parámetros mientras que se varían los valores de Symbol rate.

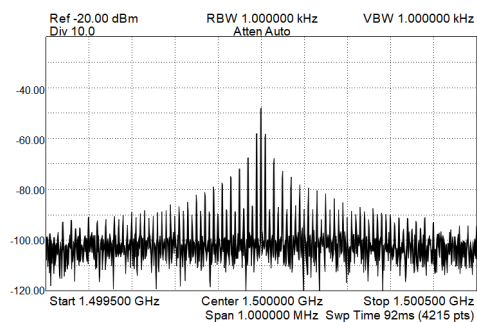




(a) Symbol rate =  $100\text{kHz}$



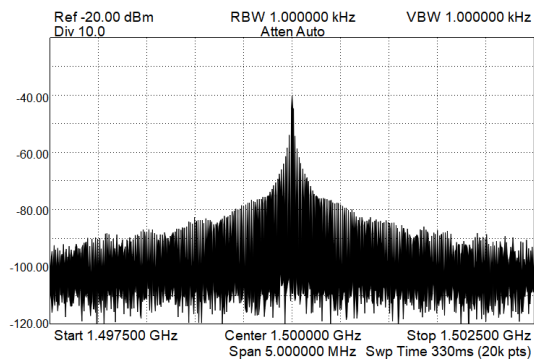
(b) Symbol rate =  $500\text{kHz}$



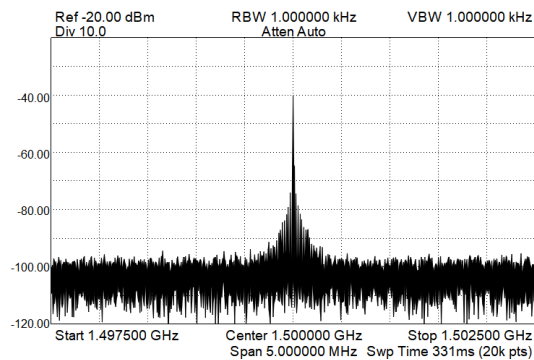
(c) Symbol rate =  $1\text{MHz}$

Figura 28: Modulación ASK, diferentes valores de symbol rate

Otra parámetro que se puede modificar es la profundidad de modulación, en la figura 29 se pueden ver dos extremos, al modular con un índice mayor se ocupa más ancho de banda.



(a) Profundidad de modulación = 1



(b) Profundidad de modulación = 0,1

Figura 29: Modulación ASK, diferentes valores de profundidad de modulación

Al enviar más bits se modifica la señal como se presenta en la figura 30, este detalle sucede si se envían ceros y unos. Si solo se envían ceros o solo se envían unos ocupa una sola componente de frecuencia, ya que es más fácil la demodulación de la trama.

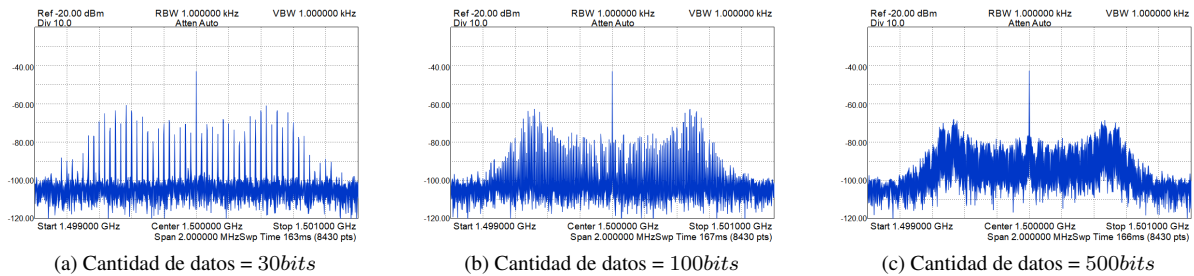


Figura 30: Modulación ASK, diferentes cantidades de datos transmitidos

### 3.3.2. Modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK)

La modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK) es una de varias técnicas utilizadas para transmitir una señal digital en un medio de transmisión analógico. La frecuencia de una portadora de onda sinusoidal se desplaza hacia arriba o hacia abajo para representar un valor binario único o un patrón de bits específico. La forma más simple de modulación por desplazamiento de frecuencia se denomina modulación por desplazamiento de frecuencia binaria (BFSK), en la que los valores lógicos binarios uno y cero están representados por la frecuencia portadora que se desplaza por encima o por debajo de la frecuencia central. En los sistemas BFSK convencionales, la frecuencia más alta representa un alto lógico (uno) y se denomina frecuencia de marca. La frecuencia más baja representa un bajo lógico (cero) y se llama frecuencia espacial. Las dos frecuencias son equidistantes de la frecuencia central. En la figura 32 se muestra una forma de onda de salida BFSK típica.

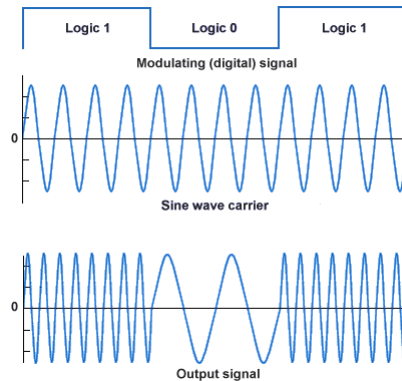


Figura 31: Modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK)

Hay una discontinuidad en la fase cuando la frecuencia se desplaza entre los valores de la marca y el espacio, se dice que la forma de cambio de frecuencia utilizada no es coherente, de lo contrario se dice que es coherente.

En esquemas más complejos, se utilizan frecuencias adicionales para permitir que cada frecuencia utilizada represente más de un bit. Esto proporciona una velocidad de datos más alta, pero requiere más ancho de banda (representando un grupo de dos valores binarios, por ejemplo, requeriría cuatro frecuencias diferentes). También aumenta la complejidad del circuito modulador y demodulador, y aumenta la probabilidad de que ocurran errores de transmisión.

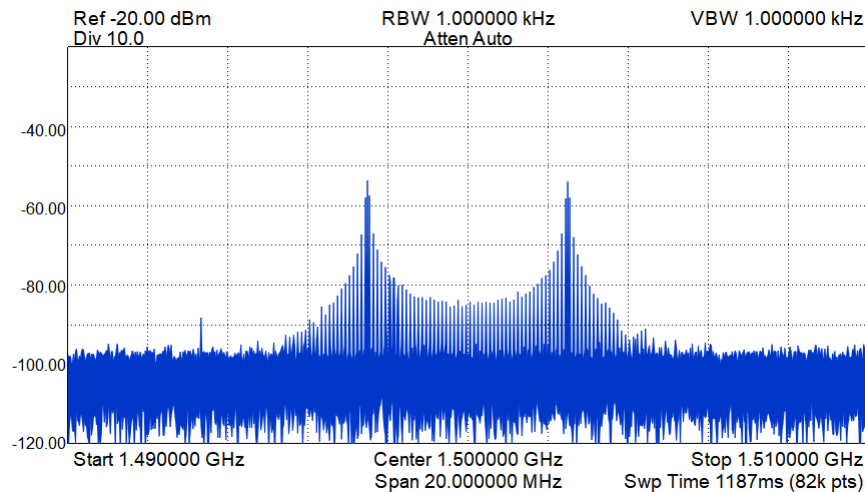


Figura 32: Modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK) en el dominio de la frecuencia

En cuanto al espectro de frecuencia de una modulación por desplazamiento de frecuencia, se puede notar la ausencia de una portadora clara, y dos bandas laterales claras que son los datos unos y ceros como se puede ver en la figura 33 en estas modulaciones se puede observar que a la derecha se envían los unos y a la izquierda los ceros.

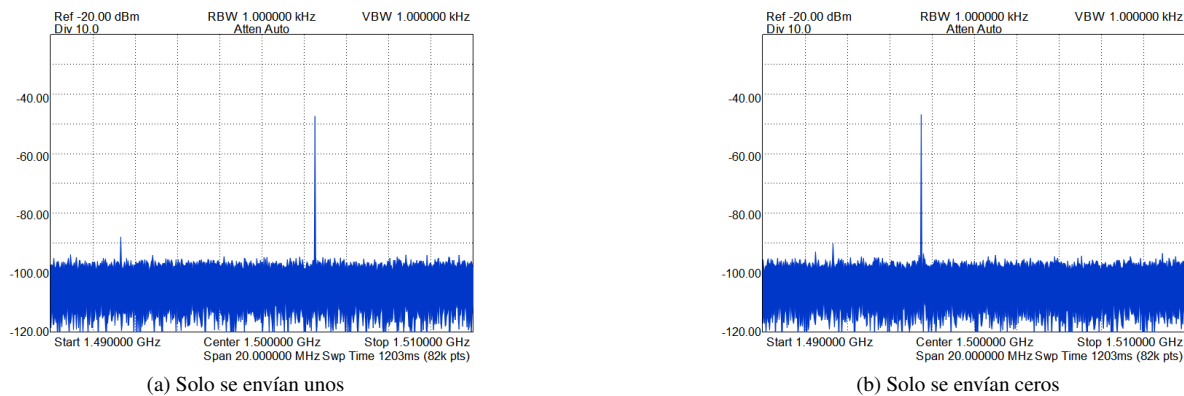


Figura 33: Modulación FSK, cuando solo se envían unos o ceros

Las opciones del generador son las mismas para los casos de ASK y FSK, estas se visualizan en la figura 34

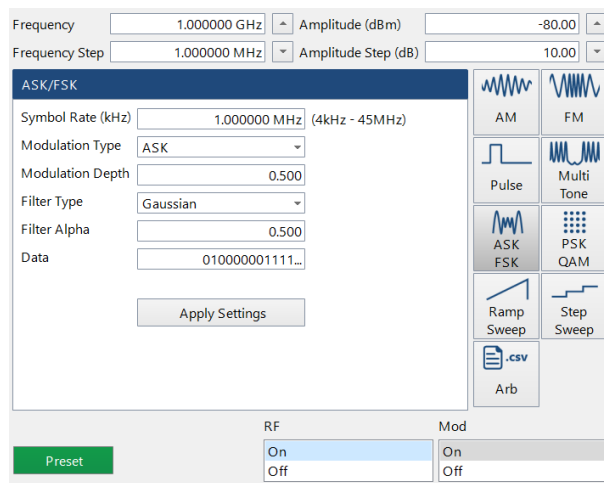


Figura 34: Pantalla y opciones del generador para una señal ASK o FSK.

### 3.3.3. Modulación por desplazamiento de fase

La modulación por desplazamiento de fase (PSK) es un proceso de modulación digital que transporta datos cambiando (modulando) la fase de una señal de referencia de frecuencia constante (la onda portadora). La modulación se logra variando las entradas de seno y coseno en un momento preciso. Es ampliamente utilizado para señales de LAN inalámbricas, RFID y comunicación Bluetooth.

Cualquier esquema de modulación digital utiliza un número finito de señales distintas para representar datos digitales. PSK utiliza un número finito de fases, cada una de ellas con un patrón único de dígitos binarios. Por lo general, cada fase codifica un número igual de bits. Cada patrón de bits forma el símbolo que está representado por la fase particular. El demodulador, que está diseñado específicamente para el conjunto de símbolos utilizado por el modulador, determina la fase de la señal recibida y la asigna de nuevo al símbolo que representa, recuperando así los datos originales. Esto requiere que el receptor pueda comparar la fase de la señal recibida con una señal de referencia; dicho sistema se denomina coherente (y se denomina CPSK).

CPSK requiere un demodulador complicado, ya que debe extraer la onda de referencia de la señal recibida y realizar un seguimiento para comparar cada muestra. Alternativamente, el cambio de fase de cada símbolo enviado puede medirse con respecto a la fase del símbolo enviado anterior. Debido a que los símbolos están codificados en la diferencia de fase entre muestras sucesivas, esto se denomina codificación de cambio de fase diferencial (DPSK). DPSK puede ser significativamente más simple de implementar que PSK ordinario, ya que es un esquema 'no coherente', es decir, no es necesario que el demodulador realice un seguimiento de una onda de referencia. Una compensación es que tiene más errores de demodulación.

En la figura 35 se observa un diagrama de constelación que es una representación de una señal modulada por un esquema de modulación digital, como la modulación de amplitud en cuadratura o la modulación por desplazamiento de fase. Muestra la señal como un diagrama de dispersión bidimensional del plano xy en el plano complejo en los instantes de muestreo de símbolos. El ángulo de un punto, medido en sentido antihorario desde el eje horizontal, representa el desplazamiento de fase de la onda portadora desde una fase de referencia. La distancia de un punto desde el origen representa una medida de la amplitud o potencia de la señal.

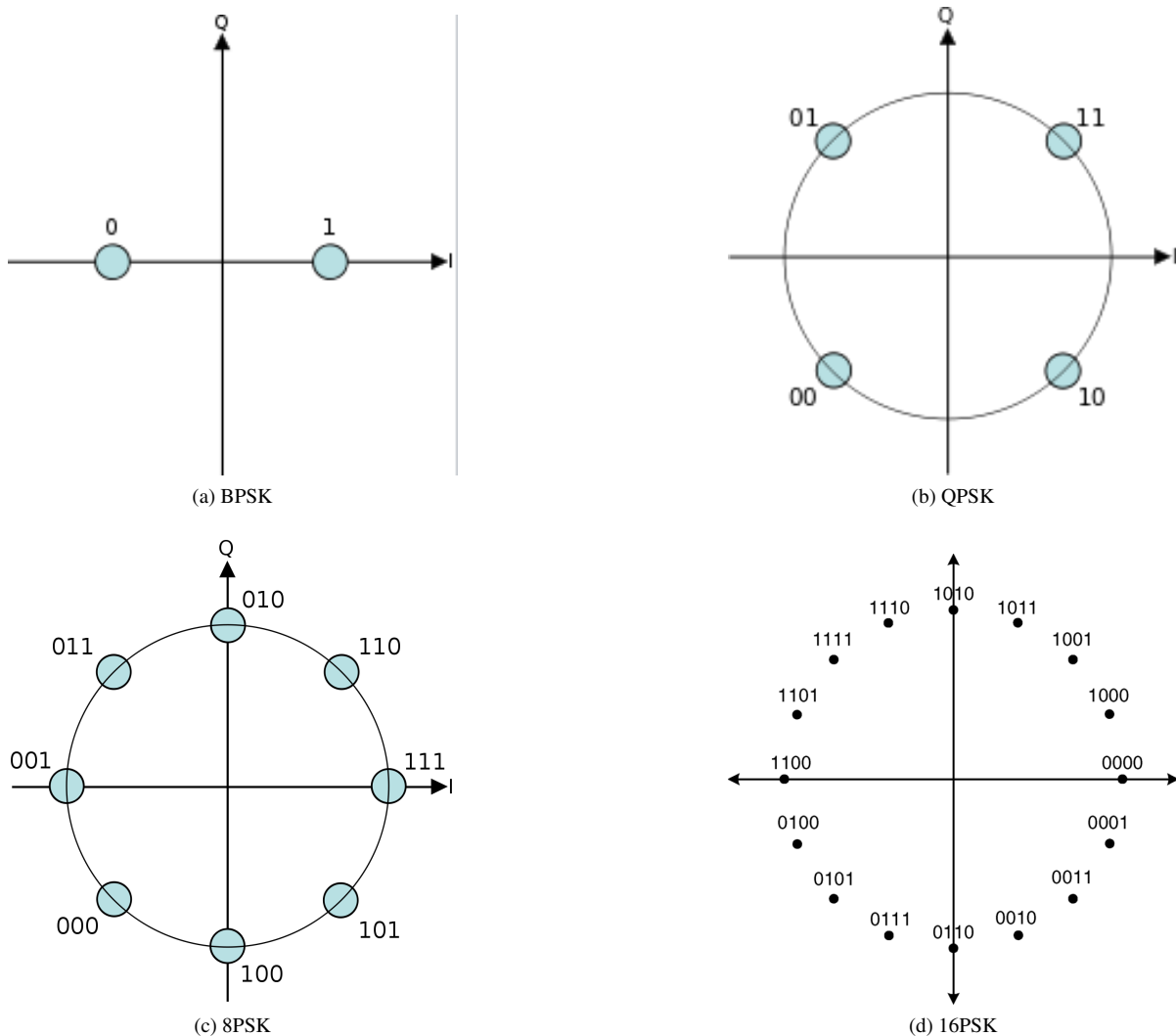


Figura 35: Diagrama de constelaciones para distintos casos de PSK

Mientras que en la figura ??

### 3.3.4. Modulación en amplitud de cuadratura

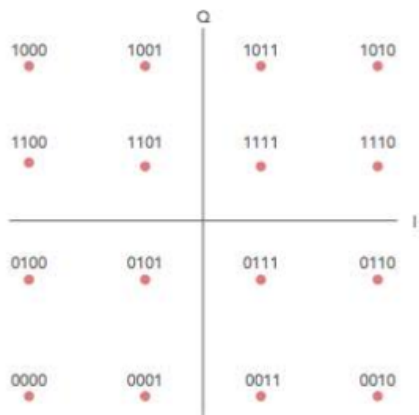
La modulación de amplitud en cuadratura (QAM) es el nombre de una familia de métodos de modulación digital utilizados en las telecomunicaciones modernas para transmitir información. Transmite dos señales de mensajes analógicos, o dos flujos de bits digitales, modulando las amplitudes de dos ondas portadoras, utilizando el esquema de modulación digital de modulación por desplazamiento de amplitud (ASK) o el esquema de modulación analógica de modulación de amplitud (AM). Las dos ondas portadoras de la misma frecuencia están desfasadas entre sí en

90 *grados*, una condición conocida como ortogonalidad o cuadratura. La señal transmitida se crea sumando las dos ondas portadoras. En el receptor, las dos ondas se pueden separar coherentemente (demodular) debido a su propiedad de ortogonalidad. Otra propiedad clave es que las modulaciones son formas de onda de baja frecuencia y bajo ancho de banda en comparación con la frecuencia portadora, que se conoce como la suposición de banda estrecha.

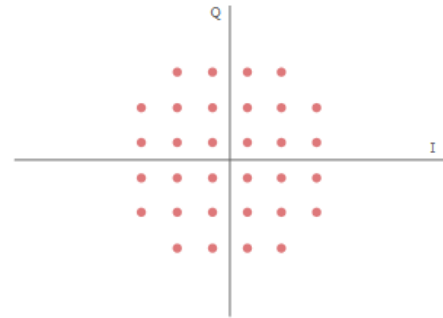
La modulación de fase (PM analógica) y la modulación por desplazamiento de fase (PSK digital) pueden considerarse como un caso especial de QAM, donde la amplitud de la señal transmitida es constante, pero su fase varía. Esto también puede extenderse a la modulación de frecuencia (FM) y la modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK), ya que pueden considerarse como un caso especial de modulación de fase.

QAM se usa ampliamente como un esquema de modulación para sistemas de telecomunicaciones digitales, como en los estándares 802.11 Wi-Fi. Se pueden lograr eficiencias espectrales arbitrariamente altas con QAM estableciendo un tamaño de constelación adecuado, limitado solo por el nivel de ruido y la linealidad del canal de comunicaciones. QAM se está utilizando en sistemas de fibra óptica a medida que aumentan las velocidades de bits; QAM16 y QAM64 se pueden emular ópticamente con un interferómetro de 3 vías.

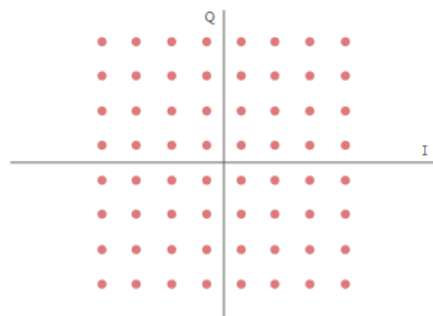
64-QAM y 256-QAM se usan a menudo en aplicaciones de televisión por cable digital y módem de cable. En los Estados Unidos, 64-QAM y 256-QAM son los esquemas de modulación obligatorios para cable digital según lo estandarizado.



(a) 16 QAM



(b) 32 QAM



(c) 64 QAM

Figura 36: Diagrama de constelaciones para distintos casos de QAM

Por último se muestran en la figura 37 las opciones del generador para las modulaciones de psk y qam.

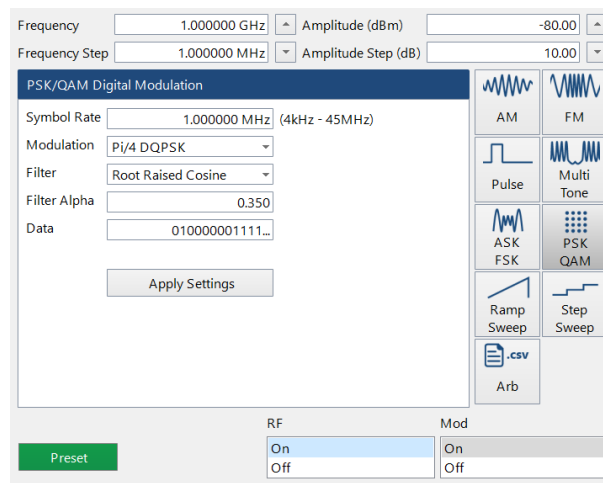


Figura 37: Pantalla y opciones del generador para una señal psk y qam.