

## Análisis Espectral con Analizador de Espectro de Barrido

### Guía de Trabajos Prácticos N° 5

## 1. Introducción teórica

### 1.1. Características generales del Analizador de Espectro de Barrido (Swept-tuned Spectrum Analyzer o SA)

En la Fig. 1(a) se aprecia el esquema general de funcionamiento de un SA de barrido. En él se puede apreciar una etapa de entrada, que consiste generalmente en un atenuador de RF para optimización de sensibilidad y un filtro pasabajos para eliminar componentes fuera de la banda de operación deseada. Luego se observa el primer mezclador, del cual se obtienen componentes de frecuencia  $f_{LO} + f_{IN}$  y  $f_{LO} - f_{IN}$ , seleccionándose  $f_{LO} - f_{IN}$  en el caso del SA superheterodino. Esta diferencia de frecuencias es la primera *frecuencia intermedia*. Ya que  $f_{LO}$  realiza un barrido controlado por una rampa, la componente de mezcla  $f_{LO} - f_{IN}$  va relevando secuencialmente el contenido espectral de la señal de entrada. Mediante una cadena de FI se amplifica y traslada la señal de FI hasta llegar a una señal de frecuencia intermedia relativamente baja, que finalmente ingresa al último filtro de FI determinando la resolución en frecuencia del instrumento. Finalmente, se detecta esta señal mediante un detector de banda ancha (básicamente un rectificador) y se muestra en pantalla. La Fig. 1(b) presenta el equipo HP 3585A disponible en el laboratorio central que será utilizado en el presente práctico. La Fig. 1(c), en tanto, muestra el equipo GW INSTEK GSP827 disponible en el laboratorio de comunicaciones.

La mínima señal que puede apreciar un SA está dada por su *sensibilidad*, dependiente del piso de ruido del analizador. Este piso de ruido es a la vez dependiente del ancho de banda de resolución (RBW) seleccionado; a menor RBW menor será el ruido pero el barrido tomará más tiempo para permitir una respuesta correcta del filtro de resolución. Además, cuando variamos el nivel de referencia (RL) estamos influyendo sobre el atenuador de entrada, el cual al disminuir la señal de entrada varía la sensibilidad. Todo esto se comprueba al observar el desplazamiento vertical de la línea base o los picos (según el diseño del analizador) al variar los controles de RBW y/o RL.

El analizador de espectro permite identificación precisa de componentes en frecuencia muy pequeñas debido a su angosto RBW (por ejemplo 3 KHz), el cual acota el nivel de ruido. Asimismo permite comparar señales de amplitudes muy disímiles (por ejemplo en relación de 80 dB) en la misma pantalla por su amplio rango dinámico.

En un AE típico se pueden identificar cinco controles principales:

- **amplitud** (reference level, RL): este ajuste controla las etapas de atenuación de entrada y ganancia de FI en forma conjunta, y tiene como objetivo lograr la máxima sensibilidad a las señales de entrada manteniéndose a la vez por debajo del nivel de saturación del primer amplificador de FI.
- **frecuencia central** (CF, para análisis seleccionable en banda): este control fundamentalmente ajusta el voltaje promedio de la rampa que controla el barrido del primer oscilador local (VCO), desplazando así el mismo ancho de barrido hacia una nueva zona del espectro.
- **span** (rango de frecuencias mostradas alrededor de la central): este control afecta la amplitud de la rampa que controla al VCO. Se destacan dos casos especiales; **zero span** donde el AE muestra la señal en el dominio del tiempo, y **maximum span** donde el AE ajusta el ancho de pantalla al valor del RBW. Ambos casos se utilizan en mediciones especiales como veremos, siendo los casos intermedios donde  $SPAN > RBW$  los utilizados comunmente. Cabe mencionar que tanto el control de CF como el de SPAN pueden ser reemplazados por el ajuste de las dos frecuencias de inicio (START) y fin (STOP) de barrido.

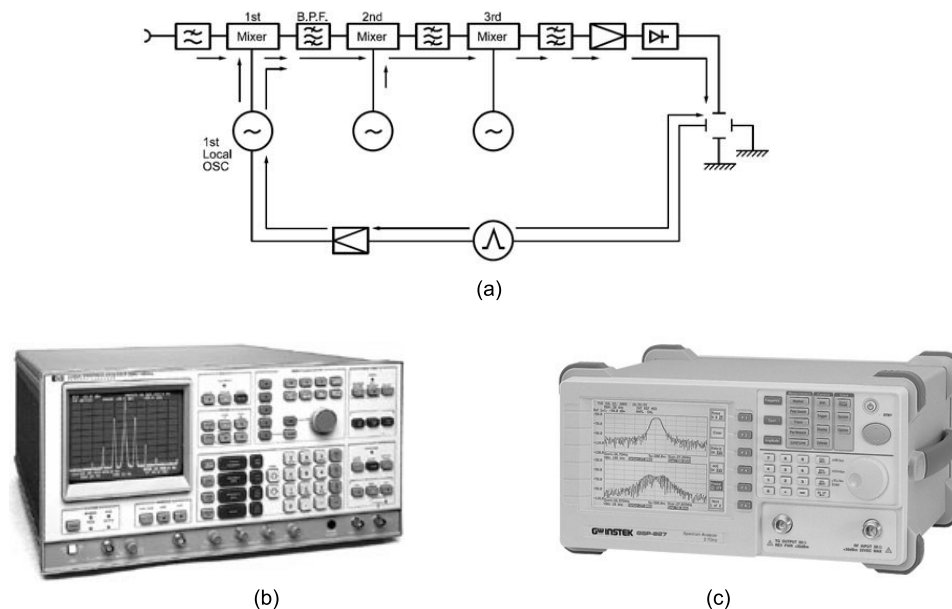


Figura 1: Analizador de espectro de barrido: (a) esquema general, (b) equipo HP 3585A, (c) equipo GW INSTEK GSP827

- **ancho de banda de resolución (resolution bandwidth, RBW)**: este control selecciona el ancho de -3 dB del último filtro de la cadena de IF, el cual determina la resolución de frecuencia (afectando también como dijimos el piso de ruido). Intuitivamente, el RBW debería ser lo más angosto posible para resolver componentes en frecuencia muy próximas y minimizar los efectos del ruido; sin embargo cuanto más angosto es el filtro también necesita mayor tiempo de establecimiento afectando el tiempo de barrido (sweep time, ST). Dependiendo del span seleccionado (número de RBWs que se muestran en pantalla), el sweep time puede volverse excesivamente grande, por tanto el ajuste de RBW es un compromiso entre resolución y tiempo. En general no debe disminuirse el RBW mas allá del suficiente para nuestra necesidad, política que es adoptada al utilizar el modo de ajuste automático.
- **ancho de banda de video (video bandwidth, VBW)**: este control actúa sobre un filtro pasa bajo posterior a la etapa de detección, es decir que actúa sobre banda base. Su objetivo es reducir el ruido presentado, tanto externo como introducido por el propio SA. Si se ajusta  $VBW < RBW$  se debe tener cuidado ya que este filtro se volverá el factor limitante del tiempo de barrido, pudiendo afectar la amplitud de la señal a medir. En general este ajuste es automático a fin de mejorar la presentación sin introducir errores.

## 1.2. Mediciones con SA

El SA es un instrumento muy versátil con el que se pueden realizar mediciones de frecuencia, potencia, modulación, distorsión y ruido, entre otras. Nos limitaremos en este práctico a analizar algunos casos típicos de uso:

- **Distorsión** armónica, por intermodulación y espurias (analizado durante el TP N° 2 por Fourier)
- **Modulaciones** en amplitud y en frecuencia
- Análisis y comparación de **líneas y pulsos** espectrales

### 1.2.1. Modulación en Amplitud (AM)

Una portadora senoidal modulada en amplitud presenta un espectro formado por la portadora, de amplitud  $E_c$  constante, y dos bandas laterales iguales a distancia  $f_m$  cuyas amplitudes  $E_{BLI} = E_{BLS} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot E_c$  están dadas por el índice de modulación  $m$ :

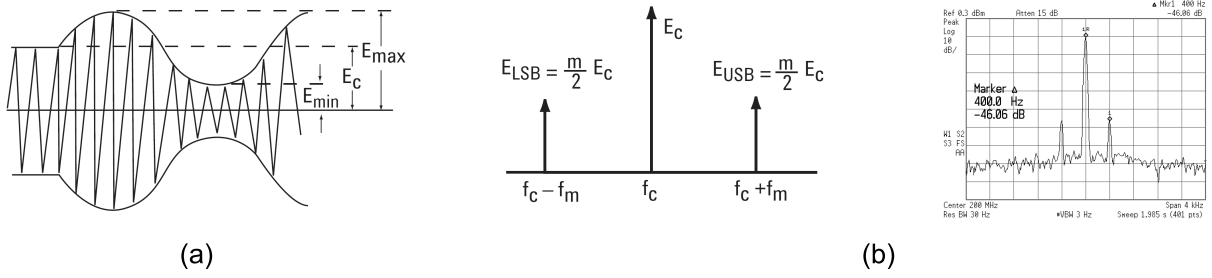


Figura 2: AM en el dominio del tiempo (a) y de la frecuencia (b)

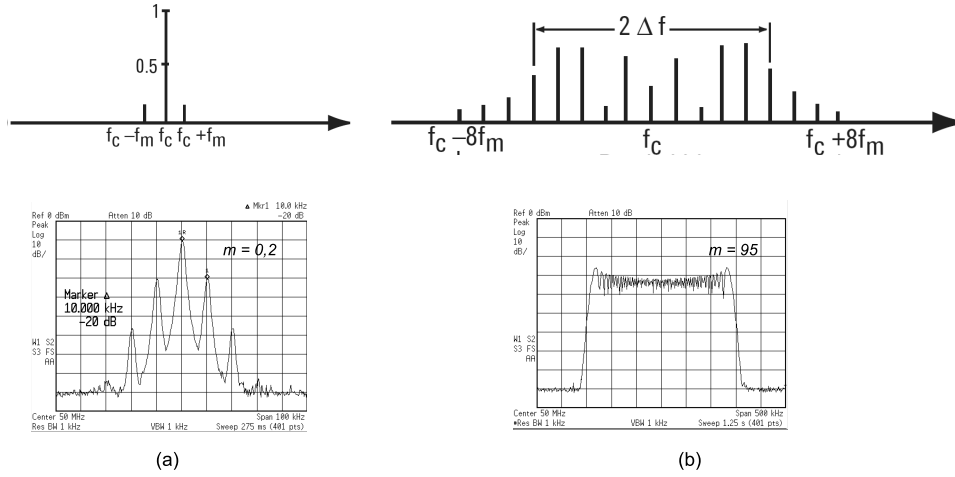


Figura 3: FM de banda angosta (a) y de banda ancha (b)

$$m = \frac{E_{max} - E_c}{E_c} = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} - E_{min}} \quad (\text{Dominio del tiempo})$$

$$m = \frac{E_{BLI} + E_{BLS}}{E_c} \quad (\text{Dominio de la frecuencia})$$

De estas expresiones, vemos que para un  $m = 1$  o del 100 % la **suma** de amplitudes de las bandas laterales es igual a la amplitud de la portadora. Como las bandas laterales son simétricas, esto significa que la amplitud de cada banda lateral es la mitad de la portadora (6 dB por debajo de ella). En el dominio del tiempo, la señal de AM es una senoide de frecuencia  $f_c$  cuya amplitud variará entre 200 % y 0 % de su amplitud original (sin modular). Por encima de este porcentaje, se presenta sobremodulación, aparaciendo bandas laterales de distorsión. Es de destacar que en AM la portadora existe aún cuando  $m = 0$ , lo cual significa un desperdicio de potencia. Otros tipos de modulación en amplitud, mas eficientes energéticamente que AM, son DBLSC y BLU, los cuales no abordaremos en este práctico.

El índice  $m$  de AM podría estimarse mediante un osciloscopio en base a la fórmula de  $m$ , sin embargo para valores de  $m$  chicos la utilización del SA es imprescindible ya que éste permite mucho mayores sensibilidad y rango dinámico. Por ejemplo, para  $m = 5\%$ , o sea  $\frac{E_{max} - E_c}{E_c} = 0,05$  las bandas laterales se encuentran a -32 dBc, cuya medición mediante osciloscopio sería inútil.

Durante medición de AM, el SA también se puede utilizar en modo *sincroscopio* para observar la señal en el dominio del tiempo, para ello se utilizan los ajustes de zero span, escala lineal, y  $RBW \geq 2.fm_{max}$ .

### 1.2.2. Modulación en Frecuencia (FM)

En modulación en frecuencia, la frecuencia de la portadora varía por encima y debajo de su valor original. La *desviación pico de frecuencia* es proporcional a la *amplitud* de la señal modulante, mientras que la *velocidad de variación en frecuencia* es proporcional a la *frecuencia* de la modulante. El *índice de modulación* en este caso se define en base a la desviación pico de *fase*:

$$m = \Delta\phi_{pico} = \frac{\Delta f_{pico}}{f_m}$$

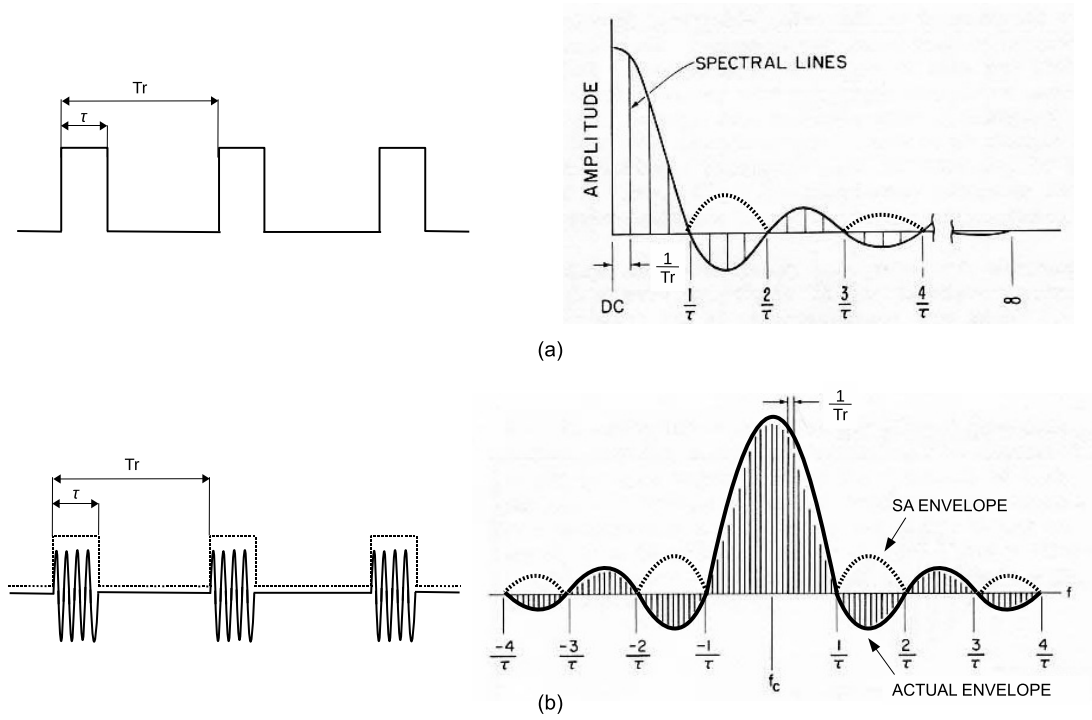


Figura 4: Modulación de pulsos: banda base (a) y señal modulada (b)

La *amplitud* de la señal FM en el dominio del tiempo permanece constante para distintos  $m$ . Las amplitudes relativas de portadora y bandas laterales varían de modo que la sumatoria de ellas resulta siempre en una potencia constante sin importar el  $m$ . Esta es una diferencia fundamental con AM, donde la potencia de bandas laterales se *suma* a la de la portadora sin modular. Teóricamente el número de bandas laterales en FM es infinito, sin embargo las componentes *significativas* ( $\geq -40dB$  de la portadora sin modular) no serán infinitas y están dadas por las funciones de Bessel según el valor de  $m$ .

Dos clasificaciones generales existen según el valor de  $m$  y su consecuente cantidad de bandas laterales significativas:

- **FM de banda angosta:** se define para valores  $m \leq 0,2$ , donde según Bessel las bandas laterales significativas son sólo dos. Por ello, este tipo de FM ocupa ancho de banda similar a AM mientras que las amplitudes relativas portadora-banda lateral también son similares (Fig. 3(a)). Esta variante suele ser utilizada en comunicaciones bidireccionales de voz.

**NOTA:** en realidad, en FM de banda angosta las bandas laterales tienen fases invertidas. Sin embargo, aquí podemos apreciar que el SA no hace diferencia respecto a esto no pudiendo distinguir este caso de una AM. El principal interés en este caso está puesto en el *ancho de banda ocupado* sin tener en cuenta la fase.

- **FM de banda ancha:** este caso se define, en general, para  $m \geq 100$ . Para estos valores de  $m$ , gran cantidad de bandas laterales son significativas dando un espectro del tipo de la Fig. 3(b). El ancho de banda ocupado se estima considerando todas las bandas laterales que estén por encima del 1% (-40 dB) de la portadora sin modular. Este es el caso de las señales FM de broadcasting.

El *ancho de banda*  $B$  ocupado por la señal de FM, si bien se puede obtener en base a los coeficientes significativos de Bessel según el caso, se puede también *estimar* rápidamente en base a la Regla de Carson:  $B = 2\Delta f + 2f_m = 2 \cdot f_m \cdot (1 + m)$ .

Es de destacar que para ciertos valores de  $m$  la amplitud de la portadora se vuelve (idealmente) cero. Cuando se realizan mediciones mediante el SA, se suelen utilizar estos puntos como referencia ya que para ellos se conoce exactamente el valor de  $m$  y el ancho de banda ocupado.

### 1.2.3. Modulación de pulsos

Las modulaciones basadas en pulsos son un amplio campo de aplicación de los SAs. De hecho, los SAs de barrido fueron originalmente diseñados para supervisar la salida de transmisores de radar; mientras que gran parte de las comunicaciones inalámbricas actuales utilizan algún tipo de modulación de pulsos.

El contenido espectral de un pulso rectangular perfecto está formado por múltiples componentes cuya envolvente es una función  $\text{sync}(x)$  de la forma  $y = \frac{\text{sen}x}{x}$ , como se muestra en la Fig. 4(a). Las componentes están espaciadas según la frecuencia de repetición de pulsos ( $PRF = \frac{1}{T_r}$ ), mientras que los nulos se encuentran a distancias inversamente proporcionales al ancho de pulso ( $\frac{1}{\tau}$ ).

Si tomamos esta señal como banda base y modulamos con ella una senoide de RF, trasladamos este espectro simétricamente alrededor de la frecuencia portadora como se muestra en la Fig. 4(b). Esto sigue el principio de AM pero esta vez con múltiples tonos modulantes. Es de destacar nuevamente que las componentes de fase negativa, tales como las que se encuentran entre  $1/\tau$  y  $2/\tau$ , serán presentadas por el SA como positivas confirmando nuevamente la pérdida de la información de fase.

Esta modulación es un caso típico donde se debe tener mucho cuidado en la *interpretación* de los resultados, ya que según los ajustes del SA obtendremos **dos representaciones de la misma señal** que son similares en forma pero tienen significado completamente distinto:

- **Línea espectral (o espectro de líneas):** este caso se da cuando  $RBW < PRF$ . Es una representación pura en el dominio de las frecuencias, el número de líneas *no* varía en función del ancho de banda o del span, la amplitud se mantiene constante
- **Pulso espectral (o intensidad espectral):** se produce cuando ajustamos  $RBW > PRF$ , es decir que el ancho de un filtro de FI *integra* más de una componente en frecuencia. Sabemos que estamos ante este tipo de presentación observando las siguientes características: El espacio entre los filtros varía con el tiempo de barrido, lo que indica que los pulsos espectrales se encuentran ahora en el dominio del tiempo. Sin embargo, la *envolvente* se encuentra aún en el dominio de las frecuencias. La amplitud de la envolvente se incrementará al aumentar RBW hasta el punto en que  $RBW \approx (1/\tau)$ , donde toda la representación se encontrará en el dominio del tiempo.

Veamos que, en general para todas las mediciones basadas en *líneas espectrales*, se debe cuidar que  $ST < SPAN/RBW^2$ . En pulso espectral, ya que el RBW abarca varias líneas, la respuesta del SA no estará limitada por el RBW sino por la *respuesta al impulso* del amplificador de FI. En esencia, lo que se ve en pantalla estará ahora limitado **no** por el RBW sino por un ancho de banda llamado *impulse bandwidth (IB)*. Este ancho se define como aquél que debería tener un filtro rectangular perfecto para producir la misma salida que un filtro gaussiano como lo es el filtro de RBW. Para filtros gaussianos se suele tomar  $IB = 1,5RBW$ . Mediante este ancho de banda impulsivo se puede calcular la *intensidad espectral SI* en [V/Hz], que es el parámetro de interés en mediciones de pulso espectral. Los mediciones de interferencia electromagnética (EMI), por ejemplo, se expresan de esta forma.

Si bien en la actualidad existen esquemas de modulación de gran complejidad, ellos se basan de una manera u otra en las modulaciones mencionadas. Por ello resulta muy importante adquirir un manejo fluido de sus características a través de mediciones. Además, por su relativa simplicidad son implementables en el laboratorio y medibles mediante instrumentos comunes.

#### 1.2.4. Span Cero

El modo de *span cero* en un analizador de espectro de barrido es cuando el oscilador local no barre en frecuencia, sino que permanece quieto a una frecuencia fija, el ancho de banda en este caso de medición esta dado por el  $RBW$ , cuando hemos medido del modo tradicional el  $RBW$  suele ser sustancialmente menor al valor del *span* por lo que afecta como será presentada la señal pero no el ancho de banda de la misma. En el caso de medición de *span cero* afecta directamente el ancho de banda de la medición por lo que una regla de oro es sintonizar el  $RBW$  3 a 5 veces el ancho de banda de -3dB del pulso a medir. Otro parámetro a considerar es el valor del  $VBW$  tiene que ser  $VBW \geq RBW$  para evitar el *smoothing* de la señal.

Lo que se logra en el modo del *span cero* es que la potencia sea presentada en el dominio del tiempo, este método se utiliza comúnmente para observar las características de una modulación de amplitud, la potencia de una banda específica o la potencia del canal de las señales digitalmente moduladas.

Para observar mediciones con *span cero*, simplemente se selecciona  $span = 0Hz$ , el analizador de espectro pasa de presentar potencia vs frecuencia a exhibir potencia mediante el ancho de banda integrador del filtro.

## 2. Práctica de Laboratorio

**NOTA:** ya que se debe compartir el uso de equipos, se recomienda familiarizarse con los puntos principales de los manuales y los conceptos teóricos antes de asistir al laboratorio a fin de no tener que repetir procedimientos.

### 2.1. Objetivos

- Familiarizarse en el uso de las técnicas para análisis espectral
- Comprender su relación con las técnicas en el dominio del tiempo y los caso de uso de cada una
- Aplicar el análisis espectral en casos típicos de medición

### 2.2. Materiales

- Generador de señales (GW-INSTTEK GFG 3015 o similar para implementar modulaciones AM y FM)
- Analizador de espectro HP 3585A con transformador de aislación (disponible en Lab central)
- Cable BNC-BNC de longitud suficiente para conectar el SA (consultar en Lab. Central/Lab. de Comunicaciones, o traer uno propio)

### 2.3. Consideraciones importantes

- El analizador de espectro HP3585A se debe alimentar a través de un transformador de aislación, disponible en el laboratorio central.
- Se debe encender el instrumento y aguardar al menos 15 minutos para su calentamiento y estabilización; en este lapso no se pueden realizar mediciones. Transcurrido este tiempo, apagarlo y encenderlo nuevamente. El trazo debería aparecer en la pantalla, y los leds OVERLOAD/UNCAL deben estar apagados. Los leds de las funciones CONT, VIEW A, MARKER, COUPLED TO SPAN, AUTO RANGE, REF LVL TRACK, FREE RUN y 50  $\Omega$  se activan por defecto. A partir de ese momento se puede comenzar a operar.
- Durante la operación, es importante que el led de OVERLOAD se mantenga apagado (puede prender brevemente durante cambios de escala). Al encenderse indica que la etapa de entrada está sobrecargada, lo que podría dañar el instrumento o alterar sus especificaciones. Se recomienda dejar activadas las funciones AUTO RANGE y REF LVL TRACK, las cuales se ocupan de auto-ajustar el atenuador de entrada, evitando sobrecargas y manteniendo óptima sensibilidad. Asimismo se utilizará la entrada de 50  $\Omega$ , manteniendo activo el led correspondiente. En el arranque estos son los valores por defecto, por lo que no es necesario modificados.
- **NUNCA se debe superar el nivel máximo de 13 VDC especificados para el analizador (observar los valores junto al conector de entrada en caso de duda). Ya que la entrada en este modelo es acoplada en DC, esto incluye TANTO los picos de CA como el OFFSET, por lo que las señales utilizadas además de ser pequeñas NO DEBEN TENER OFFSET. CORROBORAR esto en el generador ANTES de conectarlo al analizador. Por encima de estos niveles se puede dañar la etapa de entrada del instrumento. Con los niveles recomendados en este práctico se operará en una zona segura.**
- Antes de comenzar una medición se recomienda activar el botón verde INSTR PRESET. Esto lleva todos los parámetros a su estado por defecto y realiza una auto-calibración del instrumento.
- Para buscar el contenido espectral general de una señal se puede utilizar el boton FULL SWEEP, esto sólo lleva al SPAN a su valor por defecto de 40 MHz sin realizar el procedimiento de INSTR PRESET. Sobre esta base, una vez ubicada la zona de interés se procede a ampliarla.

- Se recomienda consultar al menos el capítulo 2 del manual del HP 3585A [6], *Basic operating procedures* antes y durante la realización del práctico, a fin de aprovechar correctamente las características del instrumento. **El procedimiento seguido para realizar la medición con este instrumento es parte de la evaluación oral del práctico.** Se recomienda asimismo leer las especificaciones de las págs. 1-5 a 1-10 y pag. 3-1-2, relacionándolas con lo visto en el teórico.
- Las capturas de pantalla se realizarán mediante fotografías, sólo luego de ajustar todos los controles para la mejor observación posible de las características que se piden, así como cursores para justificar los valores incluidos en el informe. Las capturas deben tener claridad suficiente para observar dichas características.

## 2.4. Algunas características prácticas del equipo HP 3585A

- en cuanto a ajustes de amplitud, el HP 3585A cuenta con auto-ajuste del atenuador de entrada para obtener en el primer mezclador el nivel correcto sin sobrecargas ni distorsión excesiva. Asimismo, la función REF LVL TRACK modifica el REF LVL según el rango auto-ajustado. De esta forma, queda a cargo del operador el ajuste fino de REF LVL y dB/div para obtener la mejor medición posible. El REF LVL puede llevarse desde 100 dB por debajo hasta 10 dB por arriba de RANGE, posicionando las señales de interés lo más cerca posible de la parte superior de la pantalla para mejor precisión de medida. Ver págs. 3-2-14 a 3-2-16 del manual.
- en cuanto a ajustes de frecuencia, este instrumento permite variar el RBW desde 3 Hz hasta 30 KHz en pasos 1,3,10. Por otro lado, su rango de frecuencias va desde 20 Hz hasta 40 MHz. Al realizar el ajuste del SPAN y RBW/VBW, tener siempre en cuenta el tiempo de barrido (sweep time, ST), a fin de lograr el mejor compromiso de medición.
- además de ajustar RBW para obtener la selectividad necesaria y un compromiso conveniente sweep time/ruido/resolución, se puede utilizar el filtro de vídeo (VBW) para mejorar la presentación. Por defecto, el instrumento ajusta automáticamente el mínimo VBW que mantenga  $VBW > RBW$  para no afectar el ST, sin embargo se pueden probar manualmente valores de VBW menores para mejorar la imagen. Recordar que el VBW no afecta la resolución, sino que sólo "limpia" la presentación. Para valores tales que  $VBW \geq RBW$ , el tiempo de barrido (ST) es determinado por el RBW (y el SPAN); pero cuando  $VBW < RBW$  el VBW comienza a afectar el ST. Para el caso especial de *Intensidad espectral*, que es una de las técnicas a utilizar en la medición de modulación por pulsos, debe mantenerse  $VBW > RBW$  a fin de no afectar la medición.
- para el uso de cursores, activar la función MARKER y posicionar el cursor en una posición conveniente, por ejemplo en la portadora de una señal modulada. Luego se pueden utilizar las funciones  $MKR \rightarrow REFLVL$  y  $MKR \rightarrow CF$  para fijar el REF LVL y CF en el punto donde estaba el marcador y referir posteriores mediciones a este punto.
- otra función útil para realizar mediciones a desplazamientos fijos (por ej. armónicas o bandas laterales múltiples) o zooms específicos es  $OFFSET + ENTER OFFSET$  y  $OFS \rightarrow SPAN$ . Consultar sección 3-2-19 del manual.
- la función DSPL LINE, ya que abarca todo el span, es útil para analizar el espectro de una señal en conjunto, por ejemplo para determinar el ancho de banda de -40 dB ocupada por una FM de banda ancha. Al desplazar esta línea verticalmente, el instrumento muestra los dB relativos al nivel de referencia fijado. Esta línea desactiva el cursor; para volver a utilizarlo se debe presionar nuevamente MARKER. La línea se borra mediante el botón CLEAR,
- la frecuencia indicada para la posición del marcador está limitada en su precisión por la exactitud del display y el barrido, por lo que para mediciones de frecuencia precisa se recomienda activar la función COUNTER, ver sección 3-8-10 del manual. Este contador realiza la medición sólo en el punto particular del marcador y es por tanto mucho más preciso en cuanto a medición de frecuencia.
- lo mostrado en pantalla es el contenido de una memoria de display de 1001 posiciones con 1024 valores/posición. El instrumento cuenta con dos memorias de este tipo; la primera de ellas es la que normalmente captura las señales, mostrada en pantalla y activa mediante la función VIEW A. La segunda permite guardar pantallas mediante  $STORE A \rightarrow B$  y comparar con capturas posteriores mediante VIEW B. También se puede mostrar el resultado de A-B. Otra función útil por ej. para analizar ocupación del espectro radioeléctrico es MAX HOLD, en este caso se muestran en pantalla

los máximos niveles registrados durante los múltiples barridos transcurridos desde que se activó la función.

- la función NOISE LVL es útil para la medición de densidad espectral de ruido *aleatorio* (NO impulsivo). Supóngase un cursor en cierta posición del espectro donde sólo se registra ruido; su lectura de amplitud será el resultado de la *integración* de este ruido en el filtro de resolución considerado. La función NOISE LVL refiere automáticamente este nivel al ancho de banda unitario, expresándolo en dBm(1Hz), dBV( $\sqrt{Hz}$ ) o V( $\sqrt{Hz}$ ). También se puede obtener en dBc(1 Hz) utilizando cursores de offset.

## 2.5. Procedimiento

1. **Ajustes básicos:** sin aplicar señal de entrada, observe el barrido en la pantalla. Utilizando un marcador, mida el nivel presente de ruido promedio (Displayed Average Noise Level, DANL) que presenta el instrumento para tres RBWs distintos. Realice al menos una captura de pantalla. Medir el nivel en dBm (dependiente del RBW utilizado). Luego medir la *densidad espectral de ruido* en dBm(ref. a 1Hz) mediante la función *NOISE LVL*. Evaluar estos valores (grandes o chicos, constantes o variables con el RBW), explicar cómo se relacionan y cómo pueden limitar una medición de espectro. Comparar con el gráfico de la pág. 1-8 del manual. ¿Cómo se puede relacionar la densidad espectral medida con la *figura de ruido* del analizador?
2. **Medición de un tono:** ajuste el generador de funciones para obtener una onda senoidal de 1 MHz y 1 Vpp. Conectar la salida del generador a la entrada de 50  $\Omega$  del SA, ajustando los controles de frecuencia, span, y amplitud (CF, SPAN, RBW/VBW, REF LVL, dB/DIV) para obtener **máxima sensibilidad** (relacionar con el Reference Level y RBW según teórico). Ajustar el span a fin de observar la distorsión armónica de cuarto orden de la señal generada. Capturar la pantalla obtenida y calcular el valor de la distorsión. Luego ajustar el span para observar la forma del filtro de resolución ( $SPAN \approx 20.RBW$ ) y utilizando cursores y/o línea, calcular su factor de forma 3dB/60dB. Comparar con la especificación del manual.
3. **FM residual, ruido de fase:** varíe el RBW desde un valor chico, aprox. 30 Hz, hasta valores grandes en el orden de 1 KHz. Capture y señale el efecto de la FM residual y del ruido de fase en los dos extremos. Indique en la imagen dónde se ven ambos efectos y qué dificultad plantean en la medición de una señal. Luego, manteniendo RBW = 3 KHz, disminuya la amplitud de la señal generada explicando el efecto que esto tiene sobre el ruido de fase. Finalmente, con la señal original de 1 Vpp, variar los controles de REF LVL y dB/div, observando si lo que se desplaza verticalmente en pantalla es el piso de ruido o el nivel de señal, justifique según lo visto en el curso teórico.
4. **Inter-relación RBW (y VBW)/SPAN/ST:** Mantener la señal de 1Vpp/1MHz conectada a la entrada, con CF=1 MHz. Consideraremos ahora cómo interactúa el conjunto de parámetros RBW/VBW/SPAN/ST. Manteniendo la función COUPLED TO SPAN activada, realizar las siguientes rutinas y relevar en una tabla los valores RBW/VBW/SPAN/ST:
  - manteniendo VBW=30KHz y SPAN=40MHz, variar RBW desde 30KHz hasta 300Hz
  - manteniendo RBW=30KHz y SPAN=40MHz, variar VBW desde 30KHz hasta 300Hz
  - manteniendo VBW=1KHz y SPAN=100KHz, variar RBW desde 30KHz hasta 10Hz

Luego ajustar RBW=100Hz y SPAN=20KHz. Manteniendo activado COUPLED TO SPAN, comenzar a bajar manualmente el ST hasta 0,6sec mediante la tecla SWEEP TIME, observando que se activa el led UNCAL. Capture y justifique lo que se observa en la pantalla al variar ST. Para alguno de los casos relevados, estimar el valor  $K$  del filtro de FI según la relación entre su tiempo de establecimiento  $\frac{K}{RBW}$  y el tiempo disponible durante el barrido  $t = \frac{ST.RBW}{SPAN}$ .
5. **AM:** ajustar el generador para modular una portadora de  $E_c = 1Vpp$  y  $f_c = 1MHz$  con tono de 10 KHz mediante AM de  $m = 100\%$  ("SPAN" en el caso del generador GFG 3015). Capture la señal en el dominio del tiempo y de la frecuencia, indicando los valores de  $E_{max}$ ,  $E_{min}$ ,  $E_c$ , bandas laterales y distorsión (si existe) en [dBc]. Disminuya  $m$  hasta un nivel donde no pueda observarlo correctamente en el dominio del tiempo. Capture valores observados en el dominio de la frecuencia para este caso. Comente qué sucedería en ambos dominios si  $m > 100\%$ .



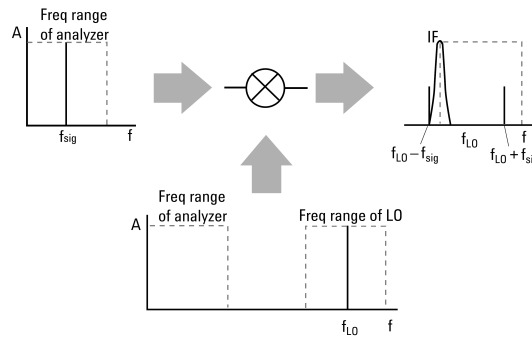


Figura 5: Productos de mezcla en 1º mixer del SA superheterodino

Lleve el índice de modulación al mínimo posible en el generador. Combinando los controles del SA, obtenga la mejor imagen posible de esta modulación, captúrela, y realice las mediciones de bandas laterales, índice de modulación y productos de distorsión si hubiere.

Intente obtener la señal en el dominio del tiempo mediante el método de *span cero*, capture la señal. ¿Cuál es el valor mínimo de *RBW* que se puede utilizar para no tener un error en la medición?

6. **FM:** configurar el generador de señales para FM con  $f_c = 1\text{MHz}$ ,  $E_c = 1\text{Vpp}$ ,  $f_m = 10\text{KHz}$  ("RATE" en el GFG-3015),  $\Delta f_{pico} = 100\text{KHz}$  ("SPAN = 10 %").
  - Calcular el índice de modulación para estos valores según la ecuación  $\Delta\phi_{pico} = m = \Delta f_{pico}/f_m$ . Seleccionar  $RBW \leq 3\text{KHz}$  (¿Por qué?), y mediante cursores o DSPL LINE observar el ancho de banda ocupado por las componentes iguales o mayores a -40 dBc (respecto a la portadora **sin modular!**). ¿Se trata de FM de banda ancha o angosta?
  - Variando  $\Delta f_{pico}$ , buscar el primer nulo de portadora. ¿Cuánto vale  $m$  en este caso? Releva los valores de las bandas laterales (amplitudes y frecuencias) y comparar con los valores predichos por Bessel.
  - Variar SPAN al mínimo hasta obtener FM de banda angosta. Calcular el valor de  $m$  obtenido. Comparar estos tres casos de FM con una modulación análoga pero de AM.
7. **Pulsos:** Generé un informe a partir de la nota de aplicación de Agilent N° 150-2, que se encuentra en la carpeta de *Google Drive*, compruebe las modificaciones que se observan en esta nota de aplicación, justifique en base al teórico que sucede con las amplitudes y frecuencias en cada caso.

## 2.6. Práctica de análisis

- Sea una señal de  $E_s = 0,5\text{Vrms}$ ,  $f_s = 2\text{GHz}$  medida mediante un SA de barrido superheterodino (Fig. 5) de 4 GHz de alcance con  $FI = 2,5\text{GHz}$ . Suponiendo un filtro gaussiano de FI con  $RBW = 30\text{KHz}$ , factor de forma 3:60 dB de 10, y despreciando las bandas laterales de ruido, graficar la forma y ubicación del filtro de FI en el eje de frecuencias. Luego graficar el barrido del LO y sus productos de mezcla  $f_{LO} + f_s$  y  $f_{LO} - f_s$ , destacando dos puntos que no detecten señal y uno donde se muestre la señal en pantalla.
- Justifique cuáles de las variaciones indicadas como (a), (b), (c) y (d) de la Fig. 6 son las que se observarán al cambiar el ajuste de RL en el AE, y explique a qué características estudiadas del AE corresponden los casos restantes.
- La constante de crecimiento de cierto SA es de  $K = 2$ . Ajustamos manualmente un  $ST = 1$  segundo, con  $RBW = 3\text{KHz}$  y  $SPAN = 50\text{MHz}$ . Sabemos que la cantidad de filtros que entran en el tiempo de un barrido es  $\frac{SPAN}{RBW}$  y que el tiempo de establecimiento del filtro es  $\frac{K}{RBW}$ . En base a esto deducir si para nuestros ajustes obtendremos una representación fiel del espectro de la señal medida.
- Los sistemas electrónicos "ven" al ruido impulsivo (por ejemplo procedente de conmutaciones) como una señal con ancho de pulsos muy pequeño ( $\frac{1}{T}$  grande) y frecuencia de repetición relativamente baja ( $PRF$  chica). Es por ello que el método más adecuado para medir el efecto que este ruido tiene sobre circuitos electrónicos es midiendo su *intensidad espectral*. Como sabemos, la intensidad

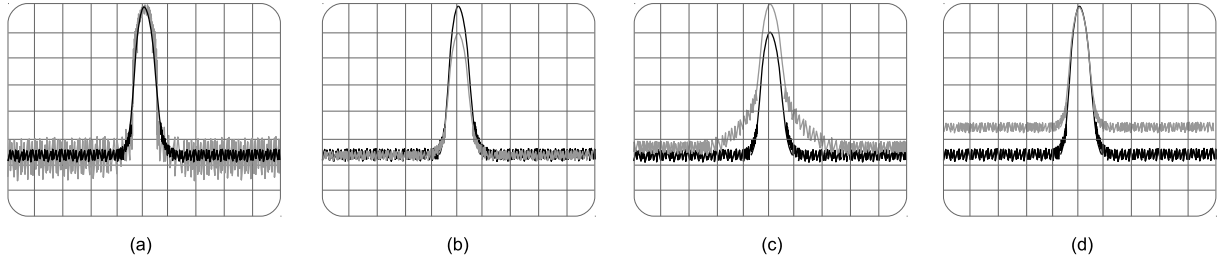


Figura 6: Variaciones de la presentación con distintos parámetros

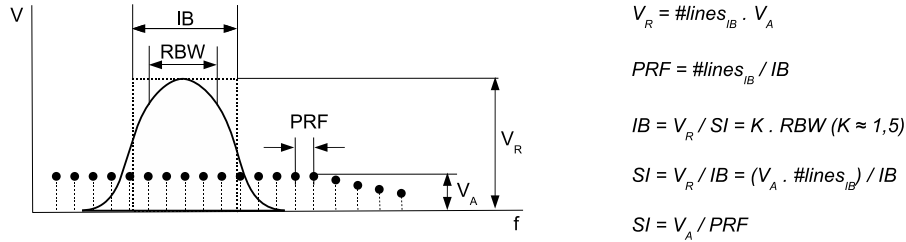


Figura 7: Análisis de ruido impulsivo

espectral se mide ajustando  $(\sim 1,7 \times) PRF < RBW < \frac{(\sim 0,2)}{\tau}$ . La tensión pico y potencia media medidas se incrementan linealmente al aumentar RBW ( $2 \cdot RBW \Rightarrow 2 \cdot Epico, 2 \cdot Pavg$ ), ya que el filtro de FI abarca mas componentes en frecuencia y el ruido impulsivo es coherente en fase (sus componentes espectrales tienen fase relativa constante). La medición de interés en este caso es la *intensidad espectral* del ruido (ver introducción teórica sobre intensidad espectral), la cual se obtiene *normalizando* la respuesta obtenida con respecto al IB. Este análisis puede observarse en la Fig. 7.

Suponiendo que una medición de ruido impulsivo arroja  $V_R = +60dBuV$  con  $RBW = 140KHz$ , y en base a estos conceptos, calcular cuál es su intensidad espectral.

- Sean una señal senoidal de  $f_1 = 1MHz, E_1 = 13dBm$  y un producto de intermodulación en  $f_2 = 1,1MHz, E_2 = -47dBm$ . Se cuenta con tres opciones de filtros gaussianos de factor de forma 10 (60:3 dB) de  $RBW = 3, 30$ , y  $300 KHz$  respectivamente, despreciando los efectos de ruido de fase y FM residual. Mediante los cálculos de RBW y factor de forma, dibujarlos indicando cuál de ellos podrá discriminar ambas señales.

## 2.7. Cuestionario de autoevaluación

1. Enumere diferencias principales de un SA superheterodino con el analizador de Fourier.
2. ¿Cómo se miden niveles absolutos y relativos en el analizador de espectro? ¿Por qué se utiliza la escala logarítmica de amplitudes?
3. ¿Qué importancia tiene el factor de forma del filtro de FI?
4. ¿Cómo se puede comprobar si estamos sobrecargando la entrada (primer mixer) del SA? ¿Por qué es importante comprobar esto?
5. ¿Qué etapas del SA afectan principalmente el nivel de ruido presentado y cómo lo hacen?
6. ¿En qué caso y por qué tendré mejor rango dinámico: para señales cercanas o lejanas en frecuencia?
7. Si tenemos dos componentes espectrales dentro de un  $RBW$ , ¿Qué señal entregará el detector de envolvente? ¿Cómo se relaciona esta señal con la que detectaría un watímetro?
8. ¿En qué se diferencian las exactitudes relativa y absoluta de un SA?

## Referencias

- [1] *Notas de aplicación Nos. 63, 63A, 150, 150-1 y 150-2*. Agilent Technologies.
- [2] *Fundamentals of Spectrum Analysis*, C. Rauscher, V. Janssen y R. Minihold. Rohde & Schwarz GmbH, 2008.
- [3] *Guide to spectrum analysis*. Anritsu, 2011.
- [4] *Fundamentals of RF pulse analysis using spectrum analyzers*. Agilent Technologies, 2004.
- [5] *Electronic Measurements and Instrumentation*, B. M. Oliver y J. M. Cage. McGRAW-HILL, 1971.
- [6] *Manuales:*  
GW INSTEK GFG 3015 (<http://www.gwinstek.com/en/product/productdetail.aspx?pid=5&mid=73&id=98>)  
Analizador de espectro HP 3585A ([www.dennlec.com/images/hp-3585a-op-manual.pdf](http://www.dennlec.com/images/hp-3585a-op-manual.pdf))