

Experiencia 1: Análisis de Fourier y uso de Analizador de Espectros

Laboratorio de Comunicaciones - ELO241 (24.04.2020)
Departamento de Electrónica, Universidad Técnica Federico Santa María

I. INTRODUCCIÓN

Esta experiencia consiste en aprender conceptos generales y prácticos sobre el análisis espectral de señales, especialmente aquellas generalmente utilizadas en telecomunicaciones. Además, la experiencia pretende entregar al estudiante los conceptos básicos sobre el uso de un analizador de espectros (AE) para realizar diferentes tipos de mediciones. Esto incluye una descripción sobre el modo de funcionamiento de un AE y sus limitaciones fundamentales. Al finalizar esta experiencia, se espera que cada alumno sea capaz de:

1. Comprender el principio de funcionamiento de un AE.
2. Utilizar las series de Fourier para predecir el espectro de señales mostrado por el AE.
3. Comprender características espectrales particulares sobre señales básicas para telecomunicaciones.
4. Aprender técnicas de medición de piso de ruido de un AE.

Se espera que los estudiantes ya poseen conocimientos sobre los conceptos básicos sobre Series de Fourier, por lo tanto, a continuación, en esta guía solo se describirá el principio de funcionamiento de un analizador de espectro.

II. EL ANALIZADOR DE ESPECTROS

Los métodos de análisis de señales se pueden resumir en dos:

1. Análisis en el dominio del tiempo: En el dominio del tiempo se visualiza la amplitud de la señal en función del tiempo. Los dispositivos más comunes para este propósito son los osciloscopios.

2. Análisis en el dominio de la frecuencia: En el dominio de la frecuencia se visualiza la amplitud asociada a cada componente frecuencia. Los dispositivos más comúnmente empleados son los analizadores de frecuencia o analizadores de espectro.

En la figura 1 se muestra de forma simple la diferencia entre los dos tipos de análisis:

- La onda cuadrada a la izquierda (idealmente periódica), tal como se observa en un osciloscopio, se puede descomponer en un número infinito de sinusoides con frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental.
- El AE permite observar la magnitud de cada una de estas componentes, apareciendo en su pantalla como líneas

verticales de una cierta altura y situadas sobre el eje horizontal de acuerdo a sus respectivas frecuencias.

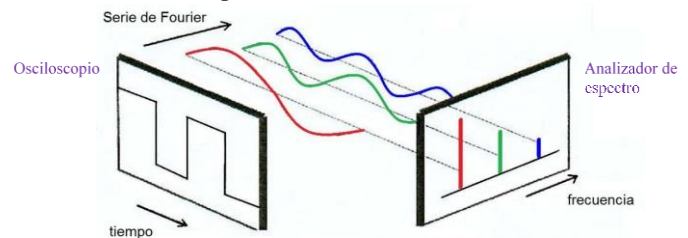


Figura 1: Señal en los dominios del tiempo y de la frecuencia [1]

El AE es más sensible a la distorsión que el osciloscopio, de modo que una señal aparentemente sinusoidal visualizada en el osciloscopio, puede tener distorsión que puede apreciarse mejor en el dominio de la frecuencia. La sensibilidad y el rango dinámico del AE lo convierten en una herramienta muy útil para medir estos tipos de distorsión. Ejemplos de aplicación: establecer la distorsión armónica de una señal sinusoidal entregada por un generador de funciones o de un modulador.

Un AE puede ser considerado conceptualmente como un receptor provisto de un filtro sintonizable de banda estrecha de frecuencias, cuya frecuencia central es controlada mediante un voltaje. Dicho voltaje corresponde a una señal en diente de sierra con la que también se controla al trazador XY de la pantalla del analizador. Este mismo voltaje en diente de sierra se aplica simultáneamente a las placas de deflexión horizontal de la pantalla del analizador. La salida del filtro sintonizado se demodula en amplitud, se amplifica y se aplica en sincronismo a las placas deflectoras verticales del osciloscopio o de la pantalla y se puede así visualizar un gráfico de la amplitud respecto a la frecuencia.

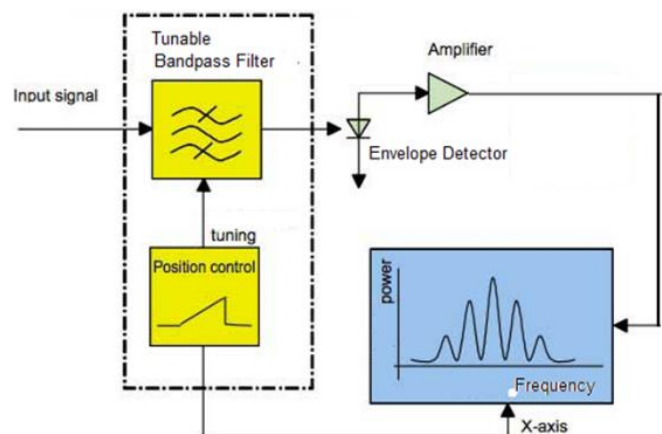


Figura 2: Analizador de Espectros conceptual.

La figura 2 adjunta ilustra este concepto, en que, si se considera que el filtro sintonizado electrónicamente actúa como una ventana espectral, se observa que en la medida que se desplaza de izquierda a derecha, selecciona las componentes espectrales de la onda presentes a su entrada.

Un aspecto que se desprende de la figura 2 es que, si la selectividad del filtro sintonizado electrónicamente no es tan aguda, es posible que se pierda resolución horizontal, ya que más de una componente espectral de la señal podrían estar presentes a la salida del filtro. Por otro lado, mientras más selectivo es el filtro, la velocidad del barrido disminuye, para que el filtro pueda desplegar fielmente la amplitud de la señal. (Esto se debe a que el tiempo de respuesta de un filtro es inversamente proporcional a su ancho de banda.)

En la práctica es muy difícil implementar filtros sintonizados electrónicamente con ancho de banda fijo, de manera que la solución comercial para desarrollar un AE es que se use, en cambio, un receptor superheterodino de banda estrecha, cuya selectividad está determinada por el filtro pasabanda a la frecuencia intermedia (en figura 3, RBW: Resolution Bandwidth Filter), sintonizado electrónicamente mediante la aplicación de un voltaje en diente de sierra (Ramp Generator) al elemento de control de un oscilador de frecuencia variable (Local oscillator) y asociado al trazador XY de la pantalla del analizador. Este mismo voltaje en diente de sierra se aplica simultáneamente a las placas de deflexión horizontal del osciloscopio o de la pantalla (en inglés: display) del analizador. La salida del receptor se aplica en sincronismo a las placas deflectoras verticales del osciloscopio o de la pantalla y se puede así visualizar un gráfico de la amplitud respecto a la frecuencia.

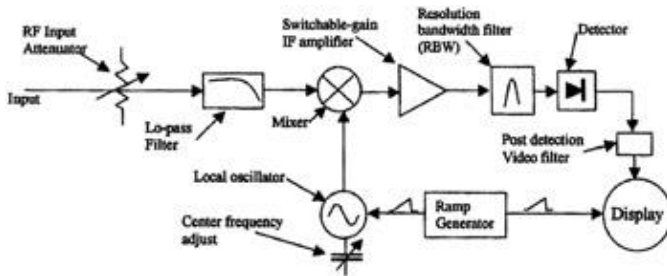


Figura 3: Analizador de Espectros a base de receptor heterodino

La sintonía en toda la gama de frecuencias se logra variando el voltaje de un oscilador local (LO), cuya frecuencia se mezcla con la de la señal de entrada para producir una frecuencia intermedia (FI) que puede detectarse y visualizarse. Entre las ventajas de esta técnica heterodina están la mayor sensibilidad, la posibilidad de sintonía en una gama de frecuencias de varias décadas y la posibilidad de variar la resolución cambiando el ancho de banda del filtro de FI.

La figura 4 (izquierda) muestra un diagrama de bloques simplificado de un analizador de espectros heterodino ¹, relacionándolo con el procesamiento al que es sometida la señal analizada

A la entrada, un condensador en serie elimina la componente continua de la señal a analizar. El resistor de 50Ω representa la impedancia de entrada del equipo, adaptada a fuentes y líneas de transmisión con impedancia característica igual a 50Ω . Un filtro pasa-bajos elimina las componentes espectrales de frecuencia elevada para evitar que en la etapa de mezcla que le sigue se produzca solapamiento de frecuencias (en inglés: *aliasing*). En dicha etapa de mezcla, la señal $s(t)$ es multiplicada (mezclada) con una señal sinusoidal proveniente de un oscilador local (LO), de frecuencia ω_L . Esta frecuencia aumenta linealmente en el tiempo al ser controlada por un generador de rampa, generando un desplazamiento “hacia afuera” de las copias del espectro de $s(t)$ (ver Fig. 4c). El filtro (pasabanda) de frecuencia intermedia (IF) que viene a continuación deja solamente la porción del espectro de $s(t)$ comprendida en la banda centrada en ω_L . Su ancho se denomina “ancho de banda de resolución” o *Resolution Bandwidth (Res. BW)*. Es posible asimilar el rol de este filtro con el de una ranura a través de la cual observamos la integral de una sección del espectro de la señal de entrada $s(t)$. El efecto de aumentar progresivamente la frecuencia del oscilador local equivale a deslizar esta ranura en el espectro, obteniendo un “barrido” en frecuencia de las componentes espectrales de $s(t)$. En el proceso, el ancho de la ranura (es decir, el parámetro *Res. BW*) determina la resolución espectral con la que realizamos dicho barrido.

Como se muestra en la etapa e) de la figura 4, el filtro de frecuencia intermedia entrega la señal pasa-banda $s(t)$, el logaritmo (en caso de trabajar en decibeles) de cuya envolvente controla la altura del trazo en la pantalla del analizador. La posición horizontal de este trazo es controlada por el mismo generador de rampa que controla la frecuencia del oscilador local. De este modo, la pantalla del AE despliega, progresivamente, la magnitud del espectro de potencia de la señal de entrada, en dBm (decibeles con respecto a 1 [mW]). Cabe hacer notar que, en el modo logarítmico, el AE mide la potencia disipada en su impedancia de entrada, de 50Ω .

El rango del espectro de la señal de entrada mostrado por el AE se define especificando, ya sea la frecuencia de partida y de parada (*Start Freq.* y *Stop. Freq.*, respectivamente), o la frecuencia central y el tamaño del intervalo espectral (*Center Freq.* y *Span*, respectivamente).

Otro aspecto importante a considerar es la relación entre *Res. BW* y la velocidad de barrido: a mayor resolución espectral escogida (es decir, si *Res. BW* es más pequeño), se debe aumentar el tiempo para refrescar la pantalla del AE, como fue explicado previamente.

Para una descripción más detallada del principio de funcionamiento del receptor superheterodino y del Analizador de Espectro, se recomienda consultar el informe técnico AN150 disponible en las referencias de la asignatura en la página o en la sección 8.1 del libro: A.B. Carlson, *Communication Systems, Third Edition, McGraw-Hill (1986)*.

¹ El término *heterodino* se refiere a la generación de una nueva frecuencia a partir de la mezcla (multiplicación) de dos señales.

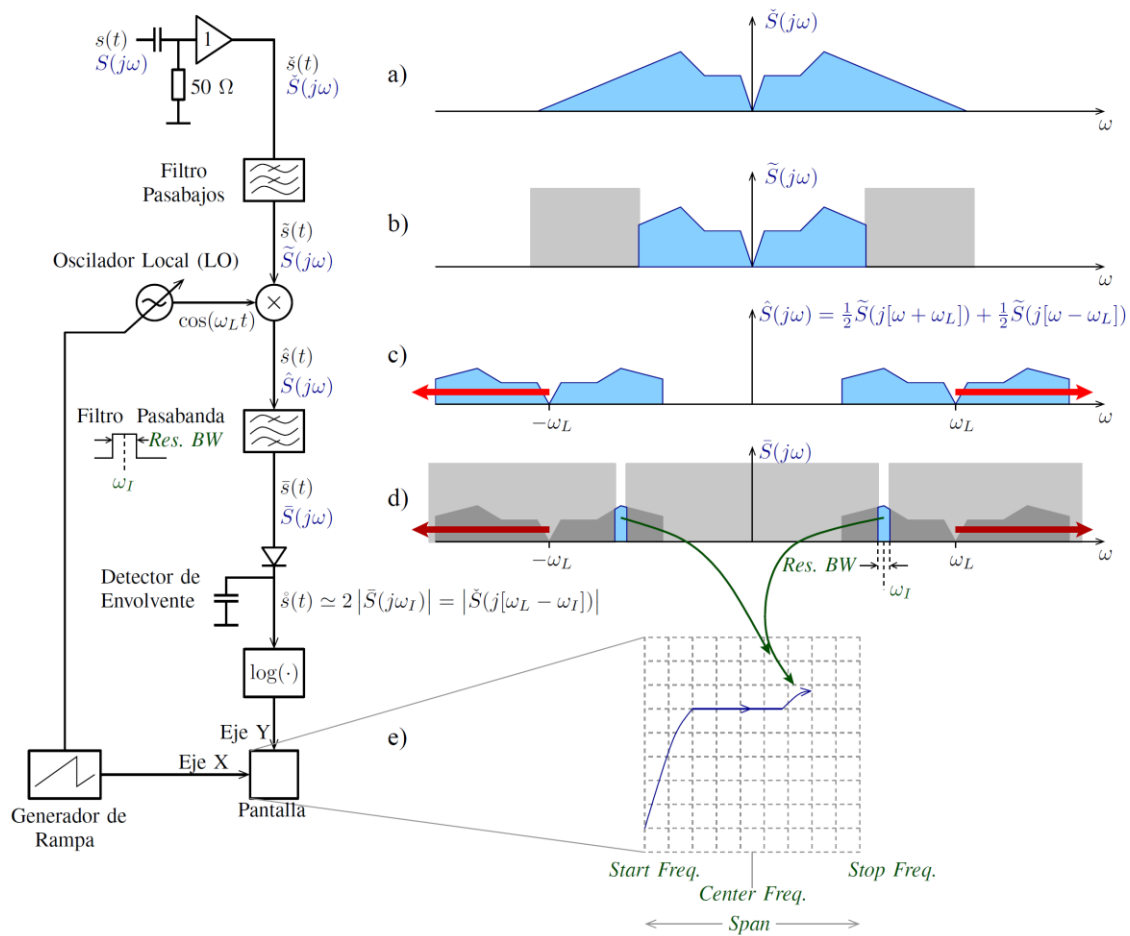
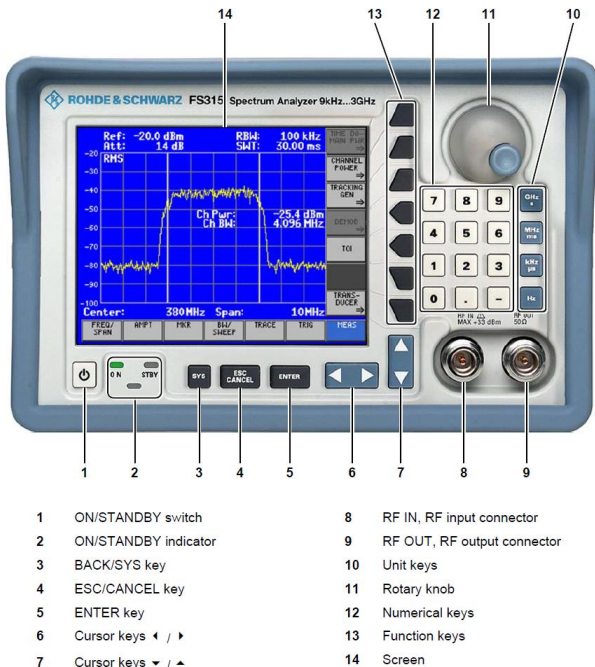


Figura 4: Diagrama de bloques simplificado de un analizador de espectros (izquierda) y representación espectral de las señales presentes en cada una de sus etapas. a) La señal de entrada sin su componente continua. b) Señal después del filtro pasabajos. c) Señal desplazada en frecuencia luego de mezclarse con señal del oscilador local de frecuencia variable ω_L . d) Segmento del espectro de la señal resultante luego del filtro pasa-banda. El ancho de su banda de paso determina el ancho de banda de resolución (resolution bandwidth). e) Trazado desplegado en la pantalla del analizador y principales parámetros configurables.



ADVERTENCIA: El analizador de espectros es un equipo delicado. Introducir una potencia excesiva en su entrada resulta en costosos daños al equipo. Para reducir este riesgo, en este laboratorio conectaremos señales al analizador siempre a través de una resistencia de $1\ [k\Omega]$.

- La parte más sensible del analizador de espectro es su circuito de entrada.
- El nivel de voltaje de señal no debe exceder de 10 mV. Si se exceden estos niveles hay peligro de dañar el aparato.
- El voltaje máximo de DC que se puede aplicar a la entrada es de 30 V.

Cuando se analizan señales desconocidas, es esencial realizar primero la medida con máxima atenuación en el rango total del barrido (500 MHz).

Figura 5: Panel frontal de analizador de espectro FS315 (similar al FS300, pero provisto de RF OUT) [2]

Especificaciones técnicas del FS300:

Frequency range		9 kHz to 3 GHz
Frequency resolution		0.1 Hz
Reference frequency		10 MHz, nominal
Aging		2×10^{-6} /year
Temperature drift	5° C to 30° C	1×10^{-6}
External reference		10 MHz
Frequency counter		
Resolution		1 Hz, 10 Hz
Count accuracy	S/N > 25 dB	\pm (marker frequency x reference error + $\frac{1}{2}$ (last digit))
Frequency span		1 kHz to 3 GHz, 0 Hz
Span accuracy		< 1 %
Spectral purity		
SSB phase noise	9 kHz $\leq f \leq$ 3 GHz	
	10 kHz carrier offset	< -90 dBc (1Hz), -95 dBc (1Hz) typ.
	100 kHz carrier offset	-100 dBc (1Hz) typ.
	1 MHz carrier offset	-110 dBc (1Hz) typ.
Residual FM	RBW 1 kHz, VBW 1 kHz 9 kHz $\leq f \leq$ 3 GHz, weighting to CCITT	< 100 Hz
Sweep time		
Span > 1 kHz		30 ms to 1000 s
Max. deviation		1 %
Span = 0 Hz		5 μ s to 10 s
Resolution		20 ns

Bandwidths		
Resolution bandwidths (-3 dB)	in 1, 2, 3, 5 sequence	200 Hz to 20 MHz
Bandwidth accuracy		
	RBW \leq 1 MHz	< 1 %
	2 MHz \leq RBW \leq 10 MHz	< 5 %
	RBW 10 MHz, 20 MHz	< 10 %
Shape factor 80 dB/3 dB	RBW \leq 3 MHz	< 4.6:1
Video bandwidths	In 1/2/3/5 sequence	10 Hz to 20 MHz

Display range		displayed average noise level to +33 dBm
Display scaling		80 dB, 40 dB, 16 dB, 8 dB, linear
Display units		
Logarithmic		dBm, dB μ V, dBmV
Linear		V, W
Maximum input level		
DC voltage		30 V
	-30 V to 30 V step	1200 V/ μ s
CW RF power		
	RF attenuator < 20 dB	+13 dBm
	RF attenuator \geq 20 dB	
	50 MHz to 3 GHz	+33 dBm
	20 MHz to 50 MHz	+26 dBm
	9 kHz to 20 MHz	+20 dBm
1dB compression point of 1 st mixer		
	RF attenuation 0 dB, f > 100 kHz	-10 dB, nominal
Linearity		
Harmonics	-40 dBm input level, RF attenuation 0 dB	< -60 dBc
Intermodulation-free dynamic range for third-order intermodulation	two-tone signal with level 2 x -30 dBm, RF attenuation 6 dB	< -70 dBc

Es importante tener en cuenta que como el rango de frecuencia de 0 a 9 kHz no está especificado en el analizador, las amplitudes de las líneas que puedan aparecer en ese intervalo no representan condiciones reales y podrán dar lecturas erróneas. Por tanto, el **rango útil de medida será desde 9 kHz hasta 3000 MHz**. A modo de ejemplo se incluye el procedimiento de medición de una señal de radiofrecuencia de 200 MHz y 1 μ W de potencia en un AE R&S FS300 en la figura 6, como es recomendado por el fabricante del equipo.

Measurement Procedure

Introduction

In this example, a signal with a frequency of 200 MHz and a level of -30 dBm is applied to the RF input [8]. The center frequency and the span are set manually.

Measurement steps

Perform the following steps:

1. Reset the R&S FS315.

- Press the **SYS** key.
- Select **PRESET** in the bottom menu bar using the cursor keys.
- Press the **PRESET** function key.

2. Apply the signal.

3. Set the center frequency (CENTER) to 200 MHz.

- Select **FREQ/SPAN** in the bottom menu bar using the cursor keys.
- Press the **CENTER** function key.
- Enter **2 0 0** using the numerical keys. Terminate the entry by pressing the unit key .

4. Reduce the SPAN to 1 MHz.

- Stay in the **FREQ/SPAN** menu.
- Press the **SPAN** function key.
- Enter **1** from the numerical keys. Terminate the entry by pressing the unit key .

5. Measure the level and frequency with the marker.

- Select **MARKER 1** in the bottom menu bar using the cursor keys.
- Press the **MARKER 1** function key.
- Press the **PERI** function key in the submenu that appears. The marker jumps to the signal peak. Turn the rotary knob to change the position of the marker.

6. Frequency measurements with the built-in frequency counter.

- Press the **COUNT** function key in the **MARKER 1** submenu. You can change the resolution of the frequency counter in the same submenu with the **RESOL** function key.

Figura 6: Procedimiento para medir señal sinusoidal de 200 MHz

III. INFORME DE LA EXPERIENCIA

A continuación, se describe el trabajo a realizar para la confección de su informe. Nótese que en algunas preguntas deberá buscar información disponible en internet, libros u otras fuentes. Incluya en sus respuestas las referencias utilizadas. No se aceptarán copias textuales desde fuentes referenciadas (y no referenciadas); en el caso de detectar un alto nivel de similitud la pregunta será evaluada con nota cero. Lo mismo ocurrirá si se detectan copias entre diferentes informes entregados.

- Presente las expresiones matemáticas de los términos de la serie de Fourier y grafique el logaritmo de la magnitud de cada coeficiente v/s su frecuencia (a mano, utilizando, si quiere, una escala cuadrículada impresa), los 20 primeros valores de la serie para:
 - Tren de pulsos de periodo $T = 50 \mu\text{s}$, con ciclo de trabajo (τ/T) de 10%, 20%, 25%, 33.3% y 50% (tensión parte baja del pulso: 0V, tensión parte alta del pulso: 1V). Determine y explique la relación entre la razón τ/T y la periodicidad con la que aparecen los nulos del espectro.
 - Repita punto anterior utilizando una señal de diente de sierra. Nótese que en este caso el ciclo de trabajo corresponde a la relación entre el tiempo de subida y bajada de la señal.
 - Determine y explique la relación entre la razón τ/T y la periodicidad con la que aparecen los nulos del espectro en puntos a) y b).

- d) Compare sus resultados con aquellos obtenidos con el Simulador (Utilice la opción AM-> Series de Fourier). Nótese que el simulador solo permite obtener la serie para señales entre -1 [V] y 1[V]. Muestre los resultados del simulador para todos los casos, y comente las posibles diferencias con sus cálculos en las preguntas 1.a) y 1.b).
- Nota: Cuando se le pide comparar resultados, en este problema en específico, debe responder a las siguientes preguntas: ¿Existen diferencias en la frecuencia de los armónicos? Si es que hay diferencias ¿a qué se debe? ¿Existe diferencia entre el cálculo de la pregunta 1.a) y 1.b) con respecto a lo obtenido por el simulador? ¿Los datos obtenidos del simulador están correctos? ¿Se pueden relacionar los cálculos obtenidos por usted con el simulador de forma directa?.
- e) Grafique A MANO dos periodos de las señales originales en el dominio temporal de los puntos a) y b), solo para ciclos de trabajo de 25% y 50%, utilizando 3, 5, 7 y 9 componentes espectrales.
- f) En base a lo anterior, describa con sus palabras cómo funcionaría un generador de señales bajo este principio.
- g) Describa por qué es importante el análisis con Serie de Fourier en el contexto de las comunicaciones.
2. Describa con sus propias palabras el principio de operación de un analizador de espectro. Incluya alguna figura esquemática de su operación, y describas las etapas internas de su operación.
3. Defina “ piso de ruido ” de un analizador de espectros. Describa algún método de medición del piso de ruido de un AE. Para tal efecto, describa el factor de corrección de amplitud (sumar 2,51 dB al nivel medido) que debe aplicarse al medir ruido Gaussiano. Estudie la influencia del ancho de banda de resolución (Res. BW) en la medición de piso de ruido.
4. Defina y ejemplifique el significado de “dB” y “dBm”. Describa cómo éstos se relacionan y cuál es la finalidad de utilizar este tipo de escala.
5. Se desea medir el espectro de una señal sinusoidal de $1.5 V_{RMS}$ utilizando un analizador de espectro.
- Determine el valor de potencia (en dBm) mostrada por el analizador de espectros a la frecuencia de la señal.
 - Repita el punto anterior, suponiendo que el generador de señales se conecta al analizador de espectros a través de un resistor de 1 [k Ω] en serie.
 - Explique por qué se utiliza esta resistencia y determine si ésta es necesaria.

IV. REFERENCIAS UTILIZADAS

- https://gtas.unican.es/files/docencia/COM/practicas/practica_1_comunicaciones_2017-18.pdf (Introducción y Figura 1)
- https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_manuals/gb_1/f/fs315/FS315_BH_G.pdf