

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BUENOS AIRES

22.42 LABORATORIO DE ELECTRÓNICA

Trabajo práctico 5: Analizador de espectros

Grupo 7

GONZÁLEZ ORLANDO, Tomás Agustín	57090
PARRA, Rocío	57669
PIERDOMINICI, Matías Nicolás	57498
STEWART HARRIS, María Luz	57676

Profesores

COSUTTA, Pablo Martín
WEILL, María Alejandra
SALVATI, Matías Damián

Presentado: 20/11/2018

Índice

1 Ejercicio 1: medición de distorsión armónica	2
1.1 Agilent 33220A	2
1.2 GW Instek GFG-8219A	2
1.3 GW Instek GFG-8019G	3
2 Ejercicio 2	4
2.1 Señal Cuadrada	4
2.1.1 Desarrollo de Fourier	4
2.1.2 Simulación de amplitud y potencia de armónicos	4
2.1.3 Mediciones y comparación de resultados	5
2.1.4 Cálculo del Duty Cycle	6
2.2 Señal Triangular	6
2.2.1 Desarrollo de Fourier	6
2.3 Simulación de potencia de armónicos	7
2.3.1 Mediciones y comparación de resultados	7
2.4 Tren de pulsos	7
2.4.1 Simulación de amplitud y potencia de armónicos	7
2.4.2 Mediciones y comparación de resultados	8
3 Ejercicio 3	9
4 Ejercicio 4	13
5 Ejercicio 5	15
6 Ejercicio 6	17
7 Ejercicio 7	18
8 Ejercicio 8	20
8.1 Sinc	20
8.2 Tren de deltas	20

1 Ejercicio 1: medición de distorsión armónica

En esta sección estudiaremos la distorsión armónica de distintos generadores de funciones, para lo cual trabajaremos con señales senoidales de frecuencia 1.7MHz y de 250mV_{pp} de amplitud. Puesto que una señal senoidal perfecta sólo posee una frecuencia, medir la relación entre la potencia correspondiente a su fundamental y la de sus armónicos nos permitirá tener una idea de la calidad del generador en este aspecto.

1.1 Agilent 33220A

Para este generador, sólo pudo observarse en el analizador de espectro el pico correspondiente al primer armónico, mientras que los demás no eran distinguibles del ruido propio del aparato.

Armónico	Frecuencia (MHz)	Potencia (dBm)
0	1.7	-14
1	3.4	-66

Tabla 1: Mediciones correspondientes al Agilent 33220A

Por lo tanto, de acuerdo a estas mediciones la *total harmonic distortion* de este generador es:

$$\text{THD} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} P_n}{P_0} \cdot 100\% \sim \frac{2.51 \times 10^{-10}\text{W}}{3.98 \times 10^{-5}\text{W}} \cdot 100\% = 0.00063\% \quad (1)$$

Esto se condice con la información obtenida de su hoja de datos, según la cual la THD debe ser menor al 0.04%.

1.2 GW Instek GFG-8219A

En este caso sí podían observarse más armónicos aparte del primero. Se decidió medir 10 armónicos, puesto que para este punto las potencias eran tan pequeñas que prácticamente no afectaban el resultado del THD.

Armónico	Frecuencia (MHz)	Potencia (dBm)
0	1.70	-14.4
1	3.40	-50.4
2	5.10	-42.8
3	6.80	-64.4
4	8.50	-62.4
5	10.2	-76.4
6	11.9	-66.0
7	13.6	-77.0
8	15.3	-66.6
9	17.0	-77.0
10	18.7	-69.0

Tabla 2: Mediciones correspondientes al GW Instek GFG-8219A

El THD obtenido a partir de estas mediciones es de 0.174%, lo cual es consistente con el $\leq 1\%$ especificado por la hoja de datos.

1.3 GW Insteek GFG-8019G

Armónico	Frecuencia (MHz)	Potencia (dBm)
0	1.70	-1.80
1	3.40	-39.6
2	5.10	-29.0
3	6.80	-48.2
4	8.50	-44.6
5	10.2	-64.0
6	11.9	-62.0
7	13.6	-63.2
8	15.3	-65.2
9	17.0	-66.6
10	18.7	-61.6

Tabla 3: Mediciones correspondientes al GW Insteek GFG-8019G

El THD obtenido a partir de estos datos es de 0.215%. También en este caso se esperaba un resultado $\leq 1\%$, es decir que se verificó la información provista por el fabricante.

2 Ejercicio 2

2.1 Señal Cuadrada

2.1.1 Desarrollo de Fourier

El desarrollo en serie de Fourier de una onda cuadrada $x(t)$, de frecuencia f_0 y de amplitud A (tensión pico) resulta ser:

$$x(t) = \sum \frac{4 \cdot A}{n\pi} \sin(2\pi n f_0 t), \quad n > 0, \text{ impar}$$

Donde $X_n = \frac{4 \cdot A}{n\pi}$ son los coeficientes de Fourier de la serie, que definen la amplitud de cada armónico.

De la fórmula anterior se deduce que la señal cuadrada tiene componentes en frecuencias bajas y altas. Además, observamos que los múltiplos pares de la frecuencia fundamental se anulan, es decir, no agregan potencia.

2.1.2 Simulación de amplitud y potencia de armónicos

En particular, la consigna indica que la señal de entrada deberá tener una amplitud de $250mV_{pp}$ y una frecuencia $f_0 = 1.7MHz$. Como el generador fue configurado en HiZ en el punto anterior y quedó configurado de esta manera cuando las mediciones fueron realizadas, se deberá tener en cuenta la transferencia del circuito formado entre la resistencia del generador de 50Ω en serie con los 50Ω del analizador de espectros, sobre el cual se realizarán las mediciones de potencia, por lo que debe tenerse en cuenta el divisor resistivo que hace que se pierda un 50% de la amplitud de la señal al ser medida por el analizador. Esto implica que las simulaciones para los armónicos deberán hacerse con una amplitud de $250mV_{pp}$.

Simulando con MATLAB 20 armónicos de dicha señal obtenemos el siguiente espectro:

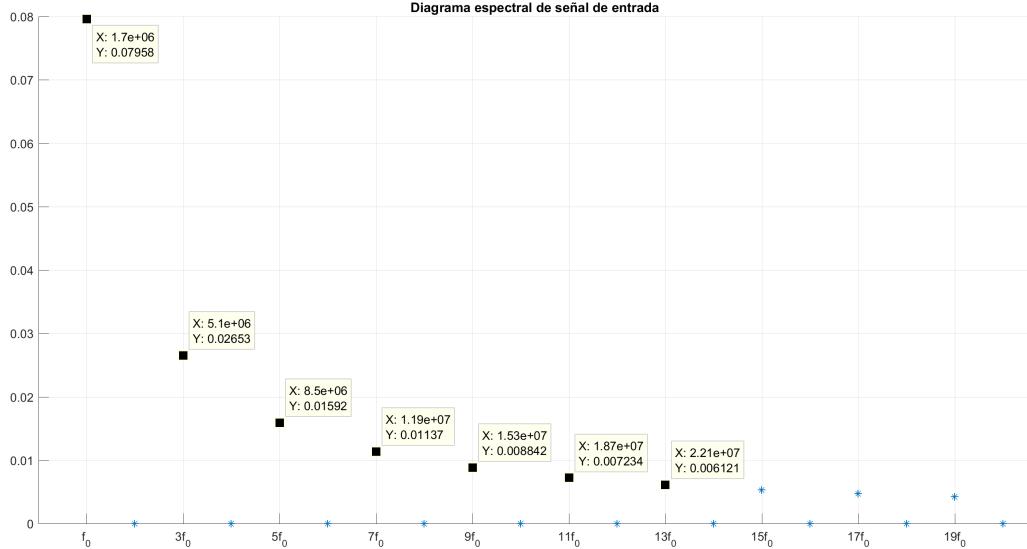


Figura 1: 20 armónicos de la señal cuadrada de entrada

Dada que la potencia estará ligada al cuadrado del módulo de la amplitud del armónico y teniendo en cuenta que esta potencia será medida sobre una resistencia de 50Ω , podemos simular también el diagrama espectral de potencia de la señal bajo la fórmula $\frac{|X_n|^2}{50}$:

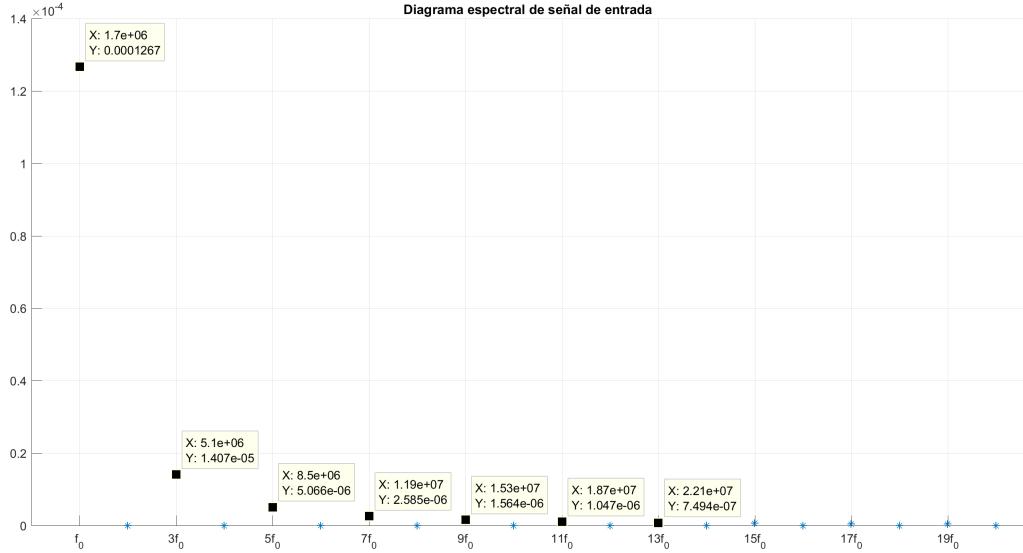


Figura 2: 20 armónicos de potencia para la señal cuadrada de entrada

Luego, utilizamos el analizador de espectros del laboratorio para poder medir la potencia de dichos armónicos. Para ello, fijamos la atenuación en 10dB y con el cursor seleccionamos el pico de cada armónico. De aquí obtuvimos la siguiente tabla de datos al haber medido como mínimo 10 armónicos para tener una medida representativa. Debe aclararse que como el generador no es ideal, la potencia de los armónicos pares no será nula, pero su potencia deberá ser indefectiblemente más pequeña que la de sus armónicos impares adyacentes.

2.1.3 Mediciones y comparación de resultados

Armónico	Frecuencia (MHz)	Potencia (dBm)	Potencia (W)
1	1.7MHz	-11.8	$6.61 \cdot 10^{-5}$
2	3.4MHz	-62.4	$5.75 \cdot 10^{-10}$
3	5.1MHz	-21	$7.94 \cdot 10^{-6}$
4	6.8MHz	-71	$7.94 \cdot 10^{-11}$
5	8.5MHz	-25.6	$2.75 \cdot 10^{-6}$
6	10.2MHz	-70	$1 \cdot 10^{-10}$
7	11.9MHz	-28.4	$1.44 \cdot 10^{-6}$
8	13.6MHz	-72.4	$5.75 \cdot 10^{-11}$
9	15.3MHz	-31.8	$6.61 \cdot 10^{-7}$
10	17MHz	-77.4	$1.81 \cdot 10^{-11}$
11	18.7MHz	-35.8	$2.63 \cdot 10^{-7}$

Hacemos notar de la tabla anterior que al multiplicar por un factor algo menor a dos a cada una de las potencias de los armónicos se obtienen los valores teóricos simulados con MATLAB. Se cree que este factor se debe al THD del generador, que es cercano al 50% (medido en el ejercicio anterior), por lo que mitad de la potencia que se obtendría teóricamente se perdería en armónicos que no son de interés, en este caso los armónicos que teóricamente tendrían potencia nula.

El mismo fenómeno se observará por lo tanto para las distintas señales a generar y medir en el analizador, como lo serán la triangular y el tren de pulsos.

2.1.4 Cálculo del Duty Cycle

Planteando la señal cuadrada con duty cycle definido por el factor de escalamiento d, donde d < T, siendo T el período de la señal:

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} A \cdot \prod\left(\frac{t - k \cdot T}{d}\right)$$

Se obtienen los coeficientes en serie trigonométrica de fourier para dicha señal:

$$y(t) = \begin{cases} a_n = \frac{2 \cdot A}{\pi \cdot n} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot n \cdot d}{T}\right) \\ b_n = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Por lo que el desarrollo en serie de fourier de x(t) queda expresado como:

$$x(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2 \cdot A}{\pi \cdot n} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot n \cdot d}{T}\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot n \cdot t}{T}\right)$$

De esta manera, observando los armónicos que se anulan se podrá deducir la relación $\frac{d}{T}$ que determina el duty cycle.

Como en la serie anterior observamos que se anulan los armónicos pares, entonces $\sin\left(\frac{\pi \cdot n \cdot d}{T}\right) = 0, \forall n = 2k, \text{ con } k \in \mathbb{Z}$. Por ende deducimos que $\frac{d}{T} = \frac{1}{2}$, por ende el duty cycle de la señal es del 50%.

2.2 Señal Triangular

2.2.1 Desarrollo de Fourier

El desarrollo en serie de Fourier de una onda triangular x(t), de frecuencia f_0 y de amplitud A (tensión pico) resulta ser:

$$x(t) = \sum \frac{8 \cdot A \cdot (-1)^{\frac{n-1}{2}}}{(n \cdot \pi)^2} \cdot \sin(2\pi n f_0 t), \quad n > 0, \text{ impar}$$

Donde $X_n = \frac{8 \cdot A \cdot (-1)^{\frac{n-1}{2}}}{(n \cdot \pi)^2}$ son los coeficientes de Fourier de la serie, que definen la amplitud de cada armónico.

Se vuelve a observar que se anulan los armónicos pares por el duty cycle del 50% y el hecho de que la señal triangular tiene simetría de media onda.

Dado que el generador no puede generar triangulares de mayor frecuencia, se seleccionó la frecuencia máxima como 200kHz.

2.3 Simulación de potencia de armónicos

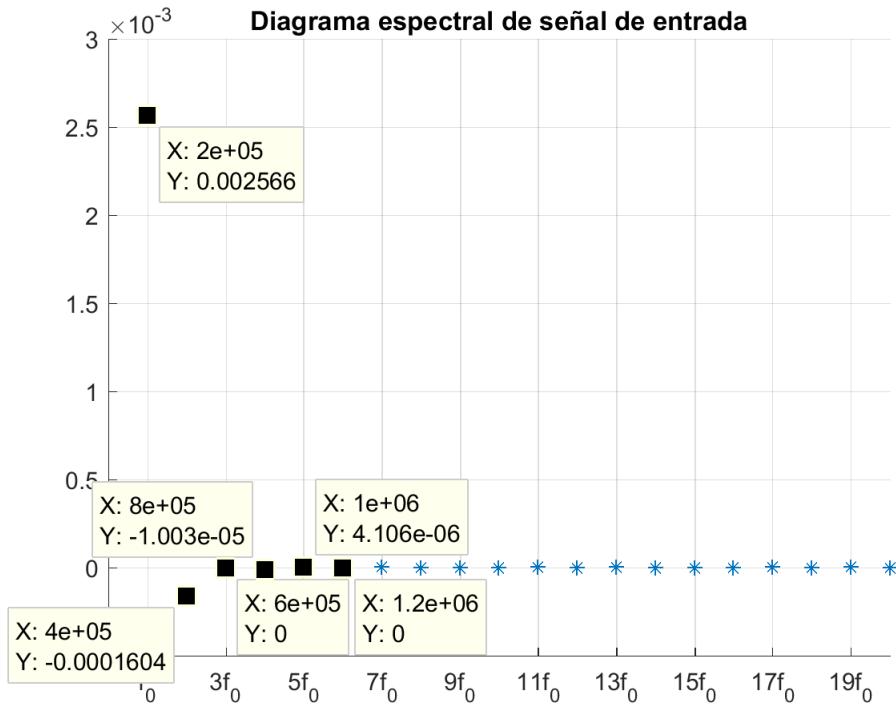


Figura 3: Espectro de la señal triangular

2.3.1 Mediciones y comparación de resultados

Armónico	Frecuencia (MHz)	Potencia (dBm)	Potencia (W)
1	0.2MHz	-15.4	$2.88 \cdot 10^{-5}$
2	0.4MHz	-56	$2.51 \cdot 10^{-9}$
3	0.6MHz	-34.2	$3.8 \cdot 10^{-7}$
4	0.8MHz	-69.8	$1.05 \cdot 10^{-10}$
5	1MHz	-43	$5.01 \cdot 10^{-8}$

2.4 Tren de pulsos

Siguiendo la fórmula desarrollada en la sección sobre el cálculo del duty cycle, observamos que para la relación $d \cdot f_0 = \frac{d}{T} = \frac{1}{3}$, (duty cycle del 33.33%) se anularán los terceros armónicos de la señal

2.4.1 Simulación de amplitud y potencia de armónicos

El espectro simulado para el tren de pulsos es:

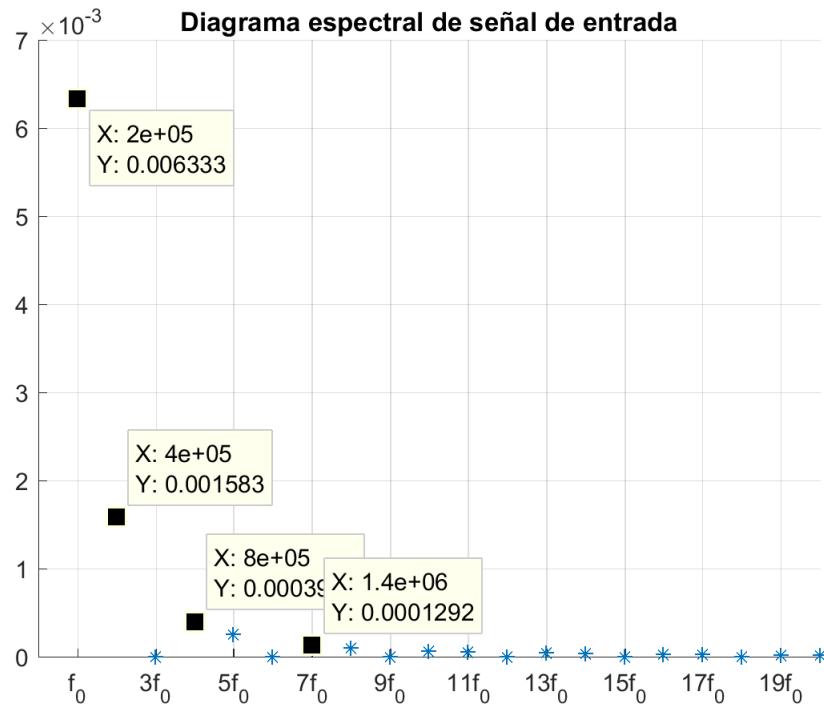


Figura 4: 20 armónicos de potencia para el tren de deltas

2.4.2 Mediciones y comparación de resultados

Armónico	Frecuencia (MHz)	Potencia (dBm)	Potencia (W)
1	0.2MHz	-13.4	$4.57 \cdot 10^{-5}$
2	0.4MHz	-19	$1.25 \cdot 10^{-5}$
3	0.6MHz	-50.6	$8.7 \cdot 10^{-9}$
4	0.8MHz	-25.2	$3.02 \cdot 10^{-6}$
5	1MHz	-26.6	$2.18 \cdot 10^{-6}$
6	1.2MHz	-50	$1 \cdot 10^{-8}$
7	1.4MHz	-30.4	$9.12 \cdot 10^{-7}$
8	1.6MHz	-30.8	$8.32 \cdot 10^{-7}$
9	1.8MHz	-50.8	$8.32 \cdot 10^{-9}$
10	2MHz	-33.8	$4.16 \cdot 10^{-7}$
11	2.2MHz	-33.4	$4.57 \cdot 10^{-7}$

3 Ejercicio 3

La modulación AM (Amplitude Modulation) consiste en modificar la amplitud de una señal portadora senoidal, $S_p(t)$ de amplitud y frecuencia fija, en base a la amplitud de una señal moduladora, $S_m(t)$. La señal modulada por AM estará dada entonces por la fórmula $S_{AM}(t) = (1 + m \cdot S_m(t)) \cdot S_p(t)$, donde m es el coeficiente de modulación, definido por: $\frac{V_{max} - V_{min}}{V_{max} + V_{min}}$.

Observando la modulación entre señales senoidales, podremos luego analizar el caso en que $S_m(t)$ no sea senoidal por superposición.

Para el caso en que tanto $S_p(t)$ como $S_m(t)$ sean senoidales, por lo tanto, se obtendrá:

$$\begin{aligned} S_{AM}(t) &= A_p \cdot (1 + m \cdot \cos(2\pi f_m \cdot t)) \cdot \cos(2\pi f_p \cdot t) \\ S_{AM}(t) &= A_p \cdot \cos(2\pi f_p \cdot t) + A_p \cdot \cos(2\pi f_p \cdot t) \cdot m \cdot \cos(2\pi f_m \cdot t) \cdot \cos(2\pi f_p \cdot t) \\ S_{AM}(t) &= A_p \cdot \cos(2\pi f_p \cdot t) + \frac{A_p \cdot m}{2} [\cos(2\pi \cdot (f_p - f_m) \cdot t) + \cos(2\pi(f_p + f_m) \cdot t)] \end{aligned}$$

Por lo que se observarán tres frecuencias principales para la señal modulada y luego sus respectivos armónicos.

Por consigna, se deberá modular con AM una señal portadora de 1.9MHz y una moduladora de 100kHz. Por límites de frecuencia, se tuvo que usar dos generadores distintos para poder modular externamente.

La señal modulada era de $200mV_{pp}$

Se muestran los espectros simulados en conjunto con los obtenidos por medición:



Figura 5: Mediciones del espectro de una señal moduladora senoidal con $m=0.5$

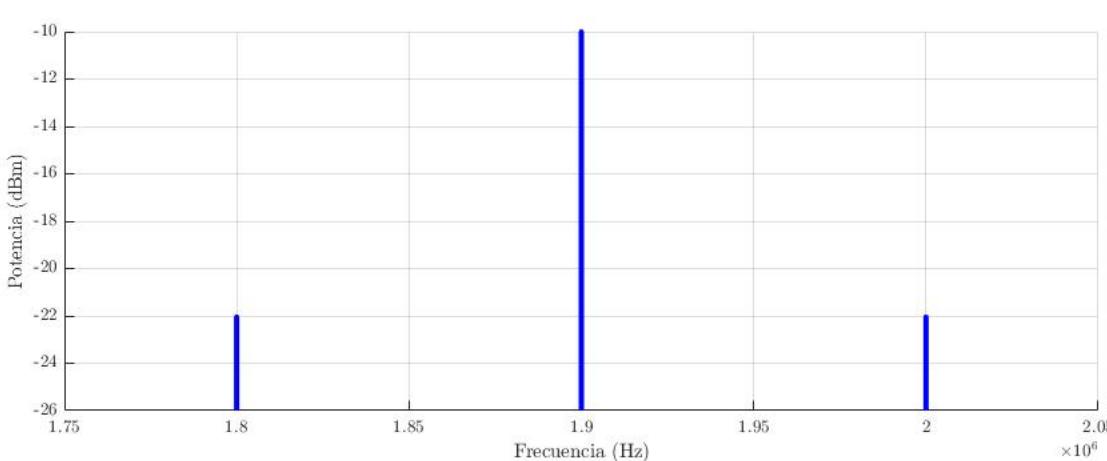


Figura 6: Mediciones del espectro de una señal moduladora senoidal con $m=0.5$

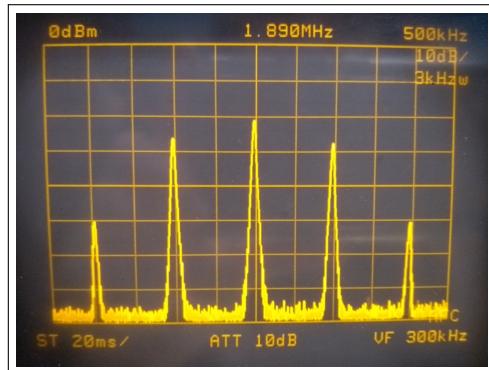


Figura 7: Mediciones del espectro de una señal moduladora senoidal con $m=1$

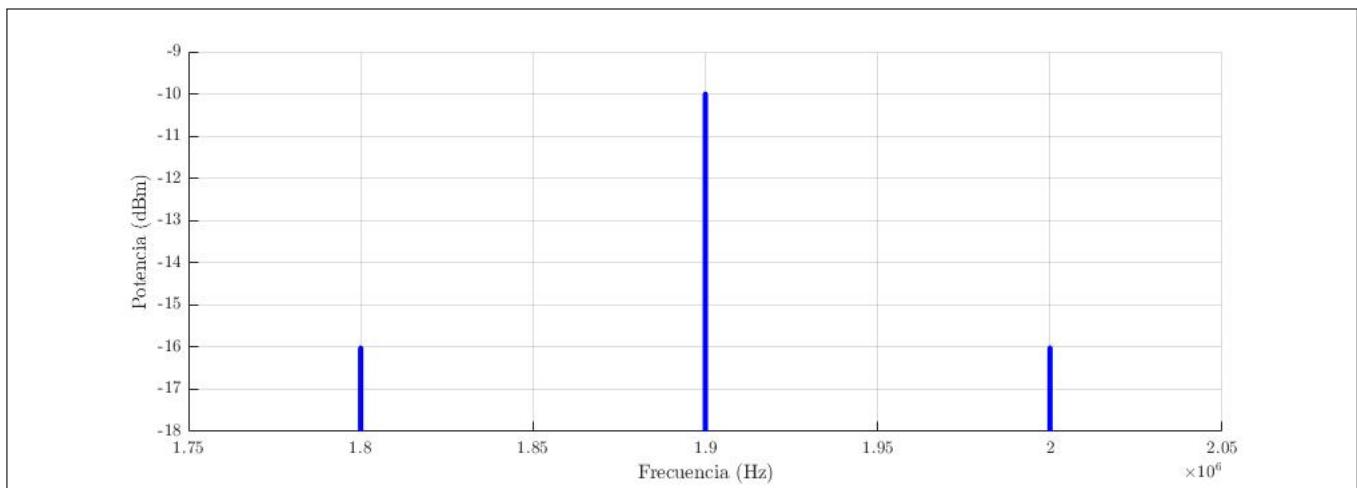


Figura 8: Simulaciones del espectro de una señal moduladora senoidal con $m=1$

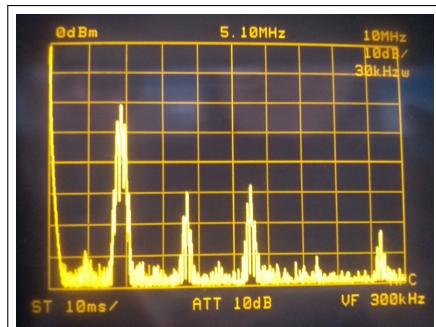


Figura 9: Mediciones del espectro de una señal moduladora senoidal con $m=1$

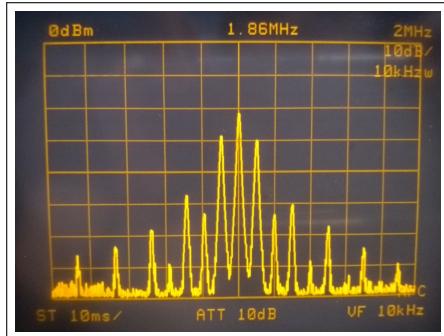


Figura 10: Mediciones del espectro de una señal moduladora triangular con $m=1$

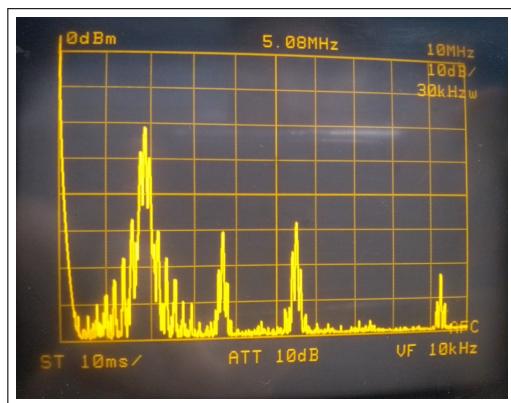


Figura 11: Mediciones del espectro de una señal moduladora senoidal con $m=1$

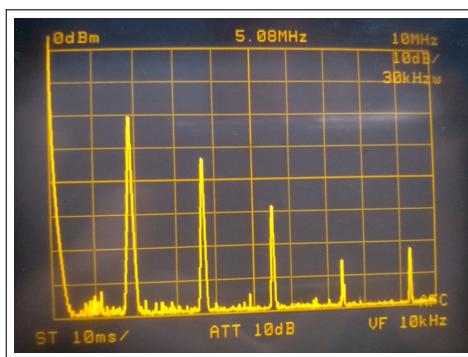


Figura 12: Mediciones del espectro de una señal moduladora senoidal con $m=1$

4 Ejercicio 4

Se procedió a observar el espectro de señales moduladas en FM. Al igual que el caso anterior, se utilizó una portadora senoidal de frecuencia 1.9MHz con amplitud 200mV_{pp}

En primer lugar, se utilizó como moduladora una señal senoidal de 100kHz.

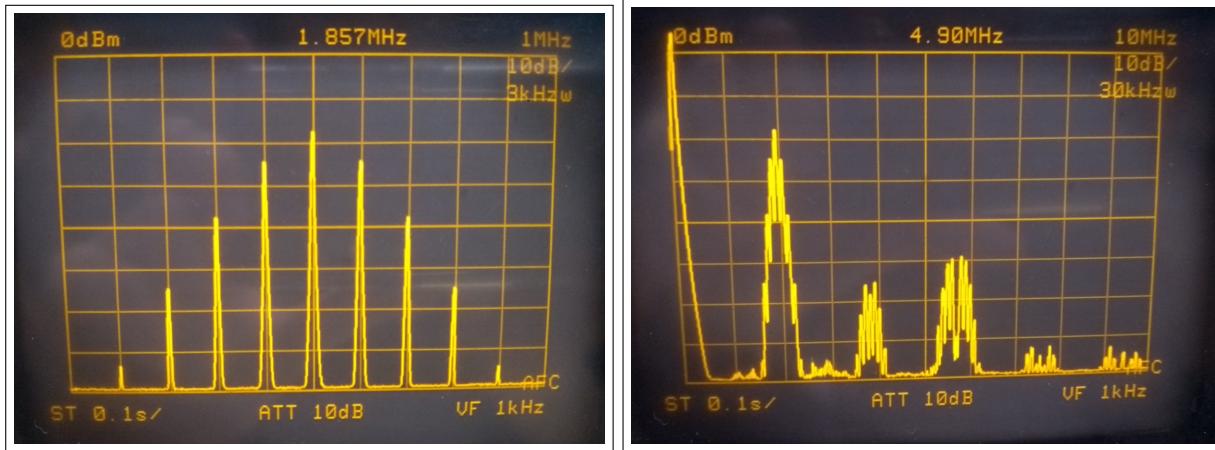


Figura 13: Espectro de FM con moduladora senoidal

Se observaron los cambios al modificar el factor de modulación de la señal.

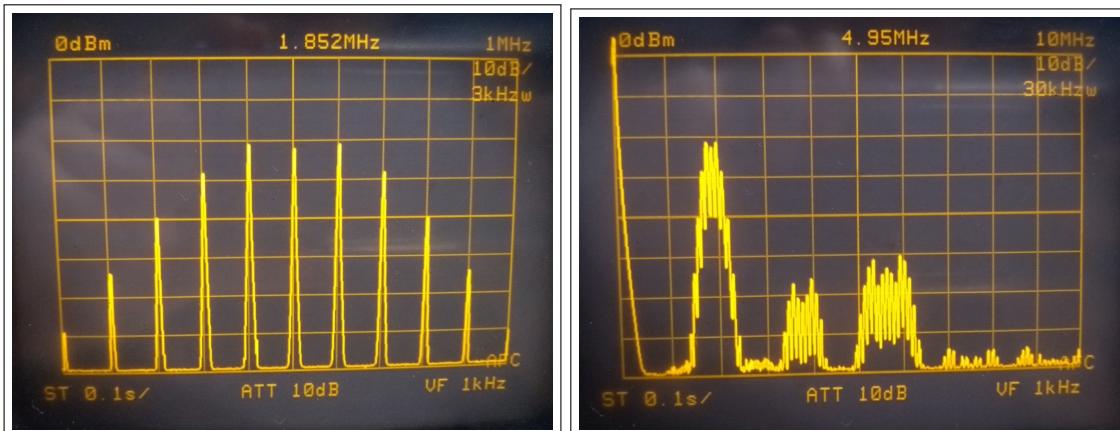


Figura 14: Espectro de FM con moduladora senoidal

En ambos casos, la forma del espectro es la misma, con picos en múltiplos de la frecuencia portadora. Cambia considerablemente, sin embargo, la relación entre la amplitud de los mismos.

Luego se procedió a modular con una señal triangular, también de 100kHz.



Figura 15: Espectro de FM con moduladora triangular

Por último, se observó el espectro cuando tanto la portadora como la moduladora tenían frecuencia de 1.9MHz.

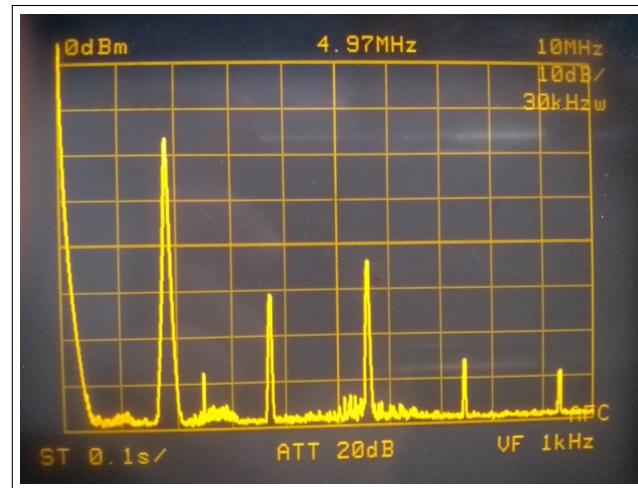


Figura 16: Espectro de FM con moduladora senoidal de igual frecuencia que la portadora

Cabe destacar que el espectro observado es similar al obtenido para señales moduladas en amplitud en todos los casos.

5 Ejercicio 5

El Ente Nacional de Comunicaciones (ENACOM) define al espectro radioeléctrico como "el conjunto de frecuencias que, conforme a la tecnología disponible, pueden ser empleadas para emitir ondas que permitan transportar información". Dado que es considerado un recurso natural sobre el cual el Estado tiene el control, se lo divide en bandas que son atribuidas a distintos Servicios y Sistemas de Comunicaciones Radioeléctricas. Esta atribución se muestra en la tabla 4.

SERVICIO	FRECUENCIAS DE OPERACIÓN	POTENCIA IRRADIADA
Radiodifusión de AM	535 - 1705 kHz	Mín 100 W Máx 100 kW
Radiodifusión de FM	88 - 108 MHz	Mín 30 W Max 100 kW
Radiodifusión de TV	TV abierta VHF bajo: 54 - 72 MHz (canales 2-4) 76 - 88 MHz (c. 5-6) VHF alto: 174 - 216 MHz (c. 7-13) UHF (en gral. TV codificada, o sea no abierta) 512 - 806 MHz (21-69)	VHF: Mín 5 kw en estación autónoma, 50 W en repetidora. Máx 30 kW en transmisor irradiado hasta 150 kW UHF (codificado, área reducida):aprox. 25 W
Telefonía celular	SRMC/STM: 869 - 894 MHz (base) 824 - 849 MHz (móvil) PCS: 1850 - 1910 MHz (móvil) 1930 - 1990 MHz (base)	Celdas en zona muy urbanizada: Aprox. 20 W Zona rural: máx. 100 W
HF	Servicio fijo y móvil (en gral uso comercial): 2 - 30 MHz Radioaficionados:bandas en los rangos de 1,8 - 3,6 - 3,8 - 7 - 10 - 14 - 18 - 21 - 25 y 29 MHz	Se especifica potencia pico de envolvente (la potencia media está unos 10 dB por debajo) Uso comercial: máx 160 W Radioafición: máximo 1,5 kW
VHF y UHF	[MHz] 30 - 50138 - 174242 - 280340 - 399421 - 426443 - 490	Handies 6 W Móvil 40 W Base 60 W Estos son valores típicos
Móvil Marítimo	Rangos HF: 4, 6, 8, 12, 16, 18, 22, 25 MHz Rangos VHF: 156, 0 - 157,5 /160,5 - 162 MHz	HF: aprox. 150 W pico de envolvente VHF: 25 W
Móvil Aeronáutico	HF (AM): entre 2 y 30 MHz VHF: 108 - 118 MHz radionavegación (ILS, VOR) 118 - 136 MHz comunicaciones móvil - tierra	HF: hasta 400 W PEP (media 100 W) VHF: 20 W

Tabla 4: CABFRA (Cuadro de Atribución de Bandas de Frecuencias de la República Argentina

Con esto en mente, se intentó sintonizar una emisión que no correspondiera a ninguna radio AM ni FM, ni televisión. Si bien se lograron observar picos de potencia en el espectro (por ejemplo, el canal de emergencia de la banda VFH del Servicio Móvil Marítimo en 156.8MHz), pero sólo se logró escuchar pitidos intermitentes. Esto se debe a que las mismas eran digitales y no analógicas, y por lo tanto el analizador no podía traducirlas a sonido de forma adecuada.

Por lo tanto, se procedió a utilizar un *handy* para tener la certeza de que la señal sea analógica y poder escucharla. Sin embargo, a pesar de que se observó un pico de potencia en la frecuencia donde se estaba trabajando, no se logró tampoco escuchar ningún sonido. Puesto que tampoco se escuchaba ruido, se concluyó que el micrófono del aparato estaba roto.

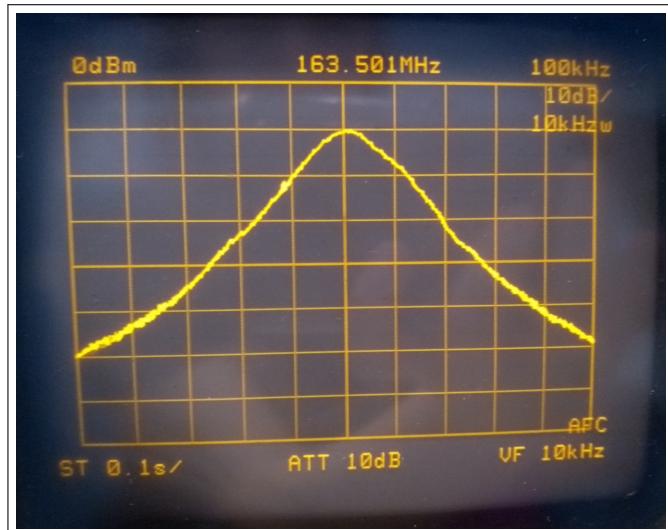


Figura 17: Espectro de la señal generada por el *handy*

6 Ejercicio 6

En Argentina, el espectro de FM (de 88MHz a 108MHz) se divide en 7 categorías (de la A a la G) según su radio de servicio, es decir hasta dónde la potencia de la estación se mantiene dentro de los $48 \frac{dB\mu}{m}$.

CATEGORÍA	RADIO DE ÁREA ESTIMADA (48 dB μ V/m - 250 μ V/m) Km.
A	90
B	80
C	70
D	45
E	28
F	22
G	9,5

También está dividido en 100 canales (desde el 201 con $f = 88.1\text{MHz}$ hasta el 300 con $f = 107.9\text{MHz}$), con 200KHz asignados a cada uno. Se sintonizó la emisora "Los 40 principales", correspondiente al canal 288 y a la frecuencia 105.5 MHz. Se pudo escuchar la transmisión de la radio conectando parlantes al analizador.

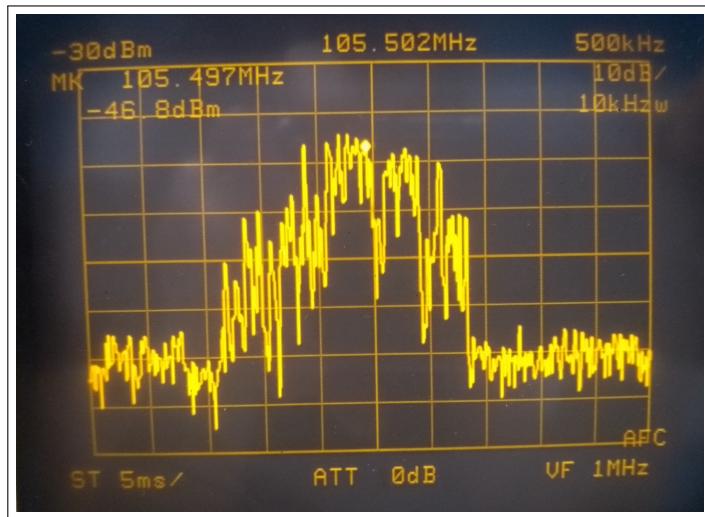


Figura 18: Sintonización a la emisora "Los 40 principales", el cual tiene asignado el canal 288 a 105.5MHz

7 Ejercicio 7

En Argentina, el espectro de frecuencias asignado a servicios de televisión abarca desde los 54 MHz hasta los 806 MHZ, exceptuando la banda de 608 a 614 MHZ, que corresponde a Radioastronomía. Está dividido en canales desde el 2 hasta el 69. A cada canal le corresponden 6MHz. A su vez, está dividido en tres bandas:

	Canales
BANDA I - VHF	2 al 6
BANDA II - VHF	7 al 13
BANDA III - VHF	21 al 69 (menos 37)

Tabla 5: Bandas del espectro destinado al servicio de televisión

Al igual que el espectro para FM, cada banda se divide en 4 categorías según su radio de servicio, es decir hasta dónde la potencia de la estación se mantiene dentro de los $50 \frac{dB\mu}{m}$. En la tabla 6 se muestra las categorías de la banda II, a la cual pertenece el canal sintonizado.

CATEGORÍA	RADIO DE ÁREA ESTIMADA ($50 dB\mu V/m$ - $316 \mu V/m$) Km.
PRINCIPAL	75
SECUNDARIA	55
MENOR	40
LOCAL	10

Tabla 6: Categorías dentro de la banda II.

El canal 11 tiene asignada la banda de frecuencias de 198 a 204 MHz. Se sintonizó la portadora de audio a 203,85 MHz(tabla 7 y figura 19)

Frecuencia	Contenido
199,25	Portadora de video
202,83	Subportadora de color
203,85	Portadora de sonido

Tabla 7: Frecuencias de transmisión del canal 11.

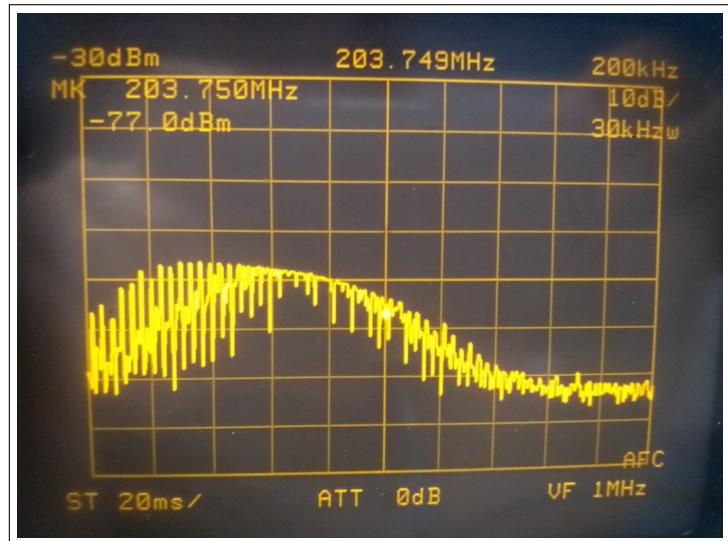


Figura 19: Sintonización a la radiodifusora canal 13.

8 Ejercicio 8

8.1 Sinc

Se observó el espectro de una señal de forma $x(t) = \frac{\sin(\pi f \cdot t)}{\pi f \cdot t} = \text{sinc}(f \cdot t)$, con amplitud 250mV_{PP} en la entrada del analizador, y frecuencia 125kHz. Por lo tanto, se espera observar en el mismo un pulso, que es su transformada de Fourier.

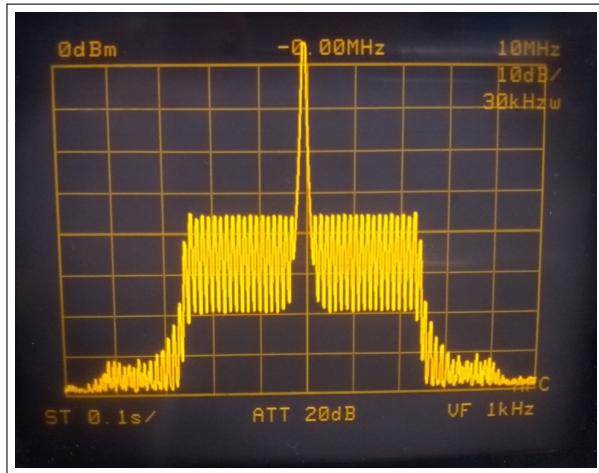


Figura 20: Espectro del sinc

Este resultado es, entonces, consistente con lo que se esperaba observar.

8.2 Tren de deltas

Se procedió a medir el espectro de un tren de deltas. En la práctica, como es imposible obtener un delta, esta señal consiste en un tren de pulsos del menor ancho que puede realizar el generador de funciones utilizado.

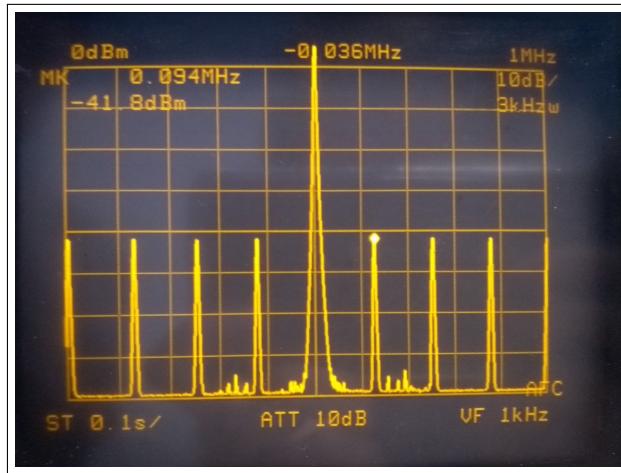


Figura 21: Espectro del tren de deltas

Al contrario de lo que ocurrió en el ejercicio 2, aquí la diferencia en la potencia de los deltas obtenidos en el espectro no es apreciable, a pesar de que en ambos casos se trabajó con señales cuadradas. Esto indica que el duty cycle de la función generada en este caso es lo suficientemente pequeño como para que el analizador lo perciba como un verdadero tren de deltas.