

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BUENOS AIRES

22.01 TEORÍA DE CIRCUÍTOS

TRABAJO PRÁCTICO 5

Analizador de Espectros

Alumnos:

Agustín DE RUSCHI 55324
Ramiro FEICHUBUINM 55369
Ignacio GLUCK 55386
Matias SELSER 55155
Diego ZERNI 54431

Profesores:
Pablo COSSUTA

November 21, 2016

Contents

I Distorsión armónica de señales	1
1 Distorsión armónica del seno	1
1.1 Calculo del error inducido en el THD	2
1.2 Medición con el generador PICOTEST G5100A	2
1.3 Medición con el generador INSTEK GFG8219A	3
1.4 Comparaciones con hojas de datos	3
2 Distorsión armónica de la señal cuadrada	3
3 Distorsión armónica de la señal triangular	5
II Señal modulada en AM y FM	6
4 Modulación AM	8
4.1 Moduladora senoidal, $m = 0.5$	8
4.2 Moduladora senoidal, $m = 1$	9
4.3 Moduladora triangular, $m = 1$	10
4.4 Moduladora senoidal, $m = 1$, de frecuencia igual a la portadora	11
5 Modulación FM	12
5.1 Moduladora senoidal	12
5.2 Moduladora triangular	13
5.3 Moduladora senoidal, frecuencia igual a la portadora	13
III Espectro de radiofrecuencias en Argentina	14
6 Características y utilidades	14
7 Distribución de canales	15
8 Espectro electromagnético en la banda de FM	17
8.1 Distribución de canales	17
8.2 Categoría de las estaciones	18
8.3 Sintonización de una emisora FM con el analizador de espectro	18
9 Espectro electromagnético de TV	18
9.1 Potencia en bandas de TV	19
9.2 Potencia en bandas de STVC	20
IV Transformada de Fourier del sinc y del tren de deltas	20
V Conclusión	21

Part I

Distorsión armónica de señales

Se procedió a realizar un análisis de la distorsión armónica de señales generadas por un generador *AGILENT 33220A*, particularmente de un seno y de una señal cuadrada.

1 Distorsión armónica del seno

Para realizar esta medición, se generó una señal senoidal con el generador de funciones de 500kHz de frecuencia, y 175mV_{pp} . Recordamos que, para la función

$$f(t) = \sin(2\pi f_0 t)$$

La transformada de Fourier es

$$\begin{aligned} \mathcal{F}\{f(t)\}(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i2\pi f t} dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \sin(2\pi f_0 t) e^{-i2\pi f t} dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{i2\pi f_0 t} - e^{-i2\pi f_0 t}}{2i} e^{-i2\pi f t} dt \\ &= \frac{1}{2i} (\delta(f - f_0) + \delta(f + f_0)) \end{aligned}$$

Por lo tanto, se debería observar solamente un armónico en $f_0 = 500\text{kHz}$ si la señal fuera ideal.

Sin embargo, en la figura 1, se observa que existe un armónico adicional en $f' = 2f_0$ y en $f'' = 3f_0$.

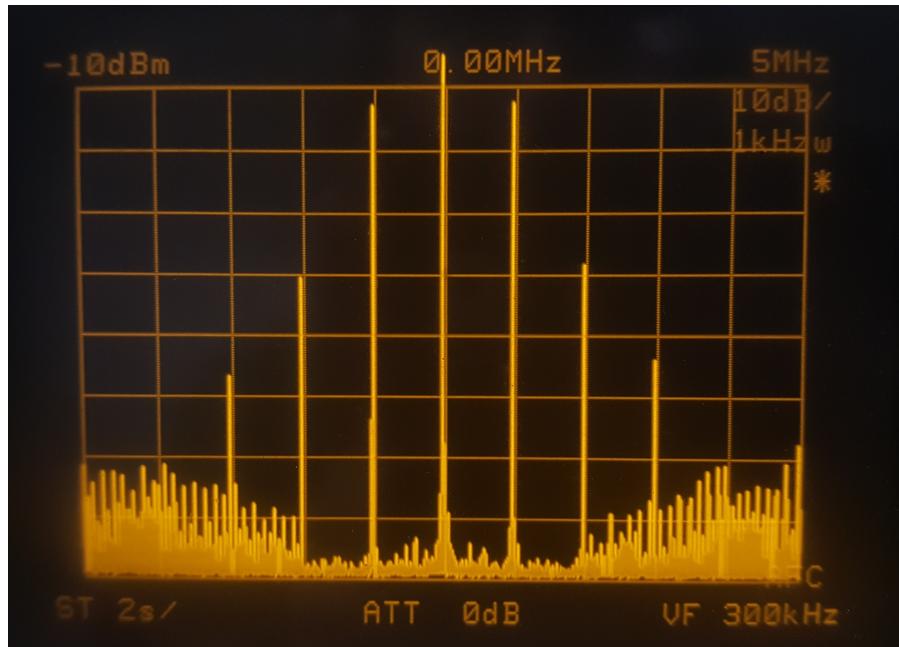


Figure 1: Medición de la distorsión armónica del seno.

1.1 Calculo del error inducido en el THD

Se define al THD como

$$THD = \frac{P_1 + P_2}{P_0 + P_1 + P_2}$$

Donde, $P_0 = -12.4 \text{ dBm}$, $P_1 = -38 \text{ dBm}$, y $P_2 = -53.8 \text{ dBm}$. Realizando la conversión a mW , obtenemos que:

$$P_0[mW] = 1 \text{ mW} 10^{\frac{P_0[\text{dBm}]}{10}} = 0.057 \text{ mW}$$

$$P_1[mW] = 1 \text{ mW} 10^{\frac{P_1[\text{dBm}]}{10}} = 1.58 \cdot 10^{-4} \text{ mW}$$

$$P_2[mW] = 1 \text{ mW} 10^{\frac{P_2[\text{dBm}]}{10}} = 4.16 \cdot 10^{-6} \text{ mW}$$

Entonces,

$$THD = \frac{1.58 \cdot 10^{-4} \text{ mW} + 4.16 \cdot 10^{-6} \text{ mW}}{0.057 \text{ mW} + 1.58 \cdot 10^{-4} \text{ mW} + 4.16 \cdot 10^{-6} \text{ mW}} = 0.0028$$

Se verifica, entonces, que el THD medido es similar al provisto por el fabricante ($THD \leq 0.004$).

1.2 Medición con el generador PICOTEST G5100A

Se realizaron nuevamente las mediciones de potencia.

$$THD = \frac{P_1 + P_2}{P_0 + P_1 + P_2}$$

Donde, $P_0 = -17 \text{ dBm}$, $P_1 = -49.4 \text{ dBm}$, y $P_2 = -69.4 \text{ dBm}$. Realizando la conversión a mW , obtenemos que:

$$P_0[mW] = 1 \text{ mW} 10^{\frac{P_0[\text{dBm}]}{10}} = 0.019 \text{ mW}$$

$$P_1[mW] = 1 \text{ mW} 10^{\frac{P_1[\text{dBm}]}{10}} = 1.14 \cdot 10^{-5} \text{ mW}$$

$$P_2[mW] = 1 \text{ mW} 10^{\frac{P_2[\text{dBm}]}{10}} = 1.14 \cdot 10^{-7} \text{ mW}$$

$$THD = \frac{P_1 + P_2}{P_0 + P_1 + P_2} = \frac{1.14 \cdot 10^{-5} \text{ mW} + 1.14 \cdot 10^{-7} \text{ mW}}{0.019 \text{ mW} + 1.14 \cdot 10^{-5} \text{ mW} + 1.14 \cdot 10^{-7} \text{ mW}} = 0.00580$$

1.3 Medición con el generador INSTEK GFG8219A

Se procedió, luego, a realizar las mediciones con el generador ya mencionado.

En este caso, se observaron cuatro armónicos.

$$THD = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{P_0 + P_1 + P_2 + P_3}$$

Donde, $P_0 = -11.8 \text{ dBm}$, $P_1 = -46.2 \text{ dBm}$, $P_2 = -51.4 \text{ dBm}$, $P_3 = -69.2 \text{ dBm}$. Realizando la conversión a mW , obtenemos que:

$$THD = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{P_0 + P_1 + P_2 + P_3} = 0.500118154$$

Lo cual demuestra que es un generador de mala calidad, dada la gran cantidad de armónicos presentes.

1.4 Comparaciones con hojas de datos

Se verifica que, en los primeros dos casos, los $THD's$ medidos coinciden con los teóricos, y en el caso del ultimo, la hoja de datos del fabricante no informa su valor para las frecuencias utilizadas.

Se comprueba, además, que los dos primeros generadores son de mucha mejor calidad que el último utilizado.

2 Distorsión armónica de la señal cuadrada

Para realizar esta medición, se generó una señal senoidal con el generador de funciones de 500 kHz de frecuencia, y $A = 175 \text{ mV}_{pp}$. Definimos $0 < \tau < T$,

$$A x(t) = A \begin{cases} 1 & |t| \leq \frac{\tau}{2} \\ 0 & |t| > \frac{\tau}{2} \end{cases}$$

$$x(t) = x(t + T)$$

Sea $f_0 = \frac{1}{T}$, dado que

$$X_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) e^{-i 2\pi n f_0 t} dt = \frac{1}{T} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} e^{-i 2\pi n f_0 t} dt = \frac{\tau}{T} \frac{e^{i 2\pi f_0 \tau} - e^{-i 2\pi f_0 \tau}}{i 2\pi f_0 n \tau} = \frac{\tau}{T} \operatorname{sinc}(n f_0 \tau)$$

Utilizando, entonces, la Transformada de Fourier periódica, obtenemos que

$$F[x(t)](f) = \frac{\tau}{T} \sum_{n \in \mathbb{Z}} \operatorname{sinc}(n f_0 \tau) \delta(f - n f_0)$$

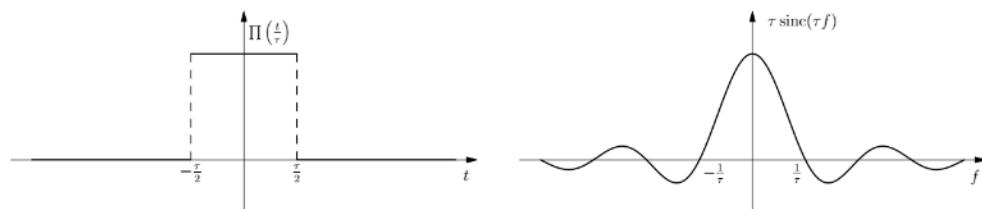


Figure 2: Par transformado del pulso.

Utilizando MATLAB, se procedió a realizar un script que permita dibujar la transformada de Fourier de tren de pulsos ideales, de la frecuencia dada, y la tensión indicada.

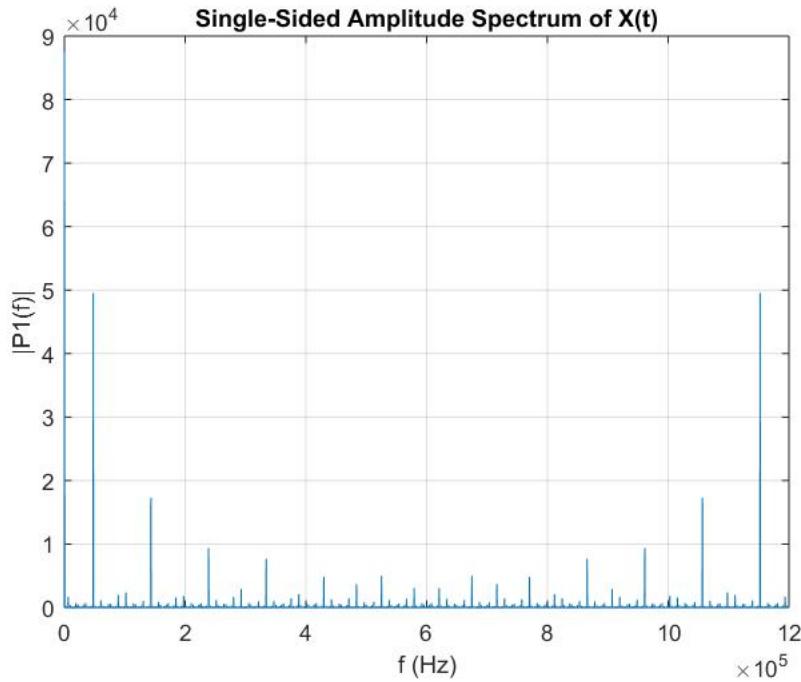


Figure 3: Gráfico de la transformada del tren de pulsos.

Generándose, un tren de sincs, simétrico respecto de la frecuencia de los pulsos.

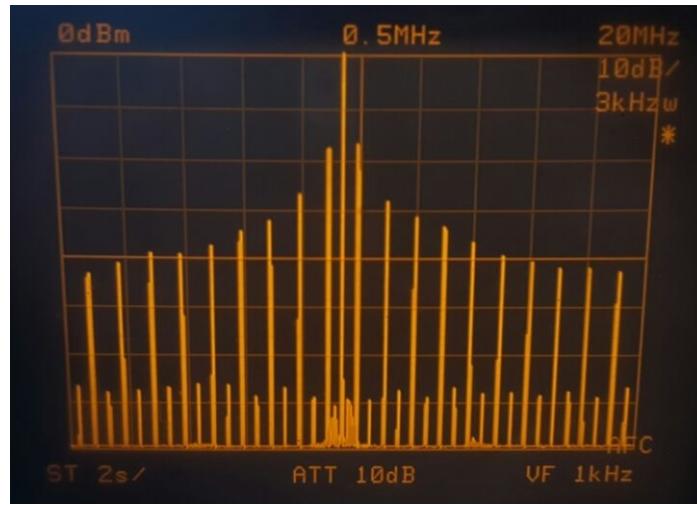


Figure 4: Espectro de la señal cuadrada (DC 50%).

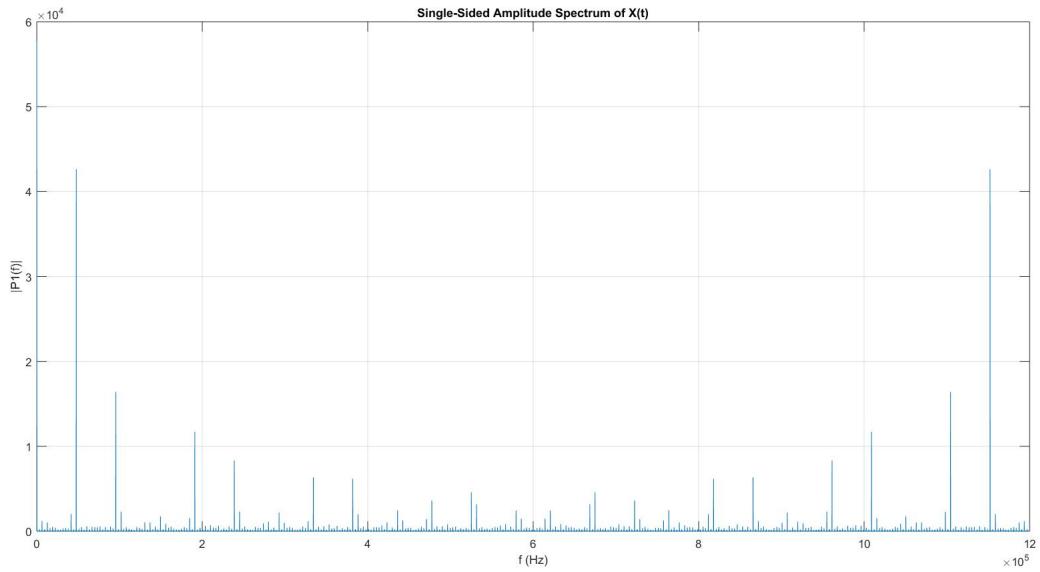


Figure 5: Gráfico de la transformada del tren de pulsos (33% de DC).

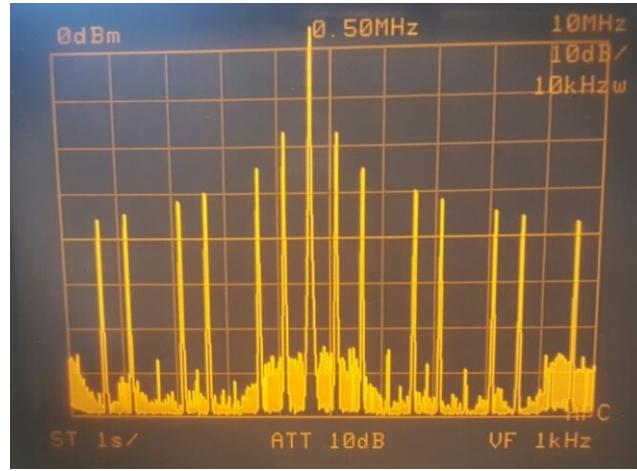


Figure 6: Espectro de la señal cuadrada (DC 33,33%).

3 Distorsión armónica de la señal triangular

Se procede a analizar una señal triangular periódica de período T , analizándose mediante Fourier. Se define entonces la función:

$$\Lambda(t) = \begin{cases} \frac{1}{\tau}(1 - \frac{|t|}{\tau}) & |t| \leq \tau \\ 0 & |t| \geq \tau \end{cases}$$

Siendo $y(t)$ su extensión periódica, donde se cumpla $y(t) = y(t + T)$.

Aplicando la transformada de Fourier se obtiene:

$$\Lambda(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \lambda(t) e^{-i2\pi f t} dt$$

$$\Lambda(f) = \text{sinc}^2(f\tau)$$

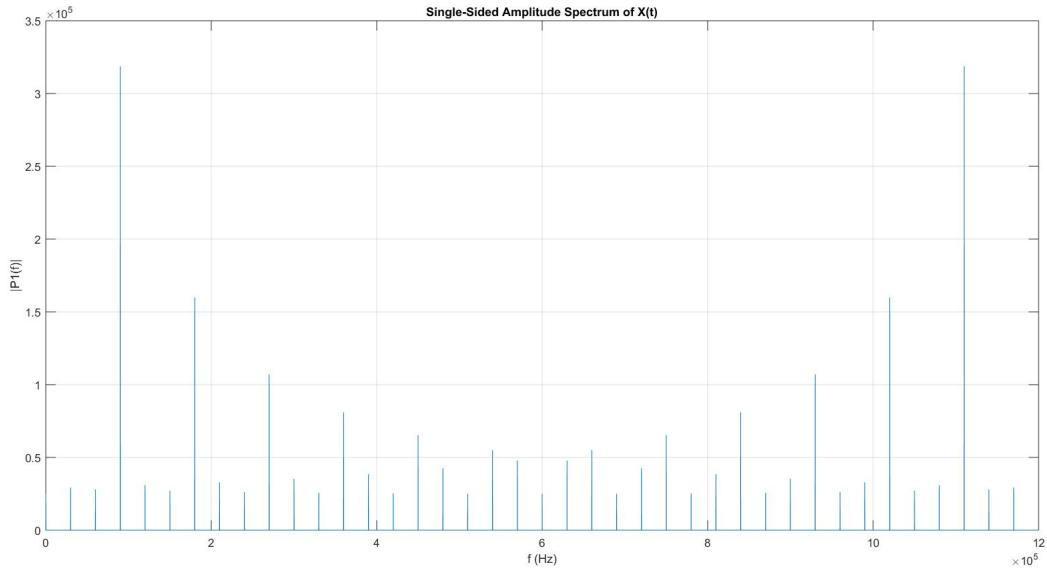


Figure 7: Gráfico de la transformada una señal triangular.

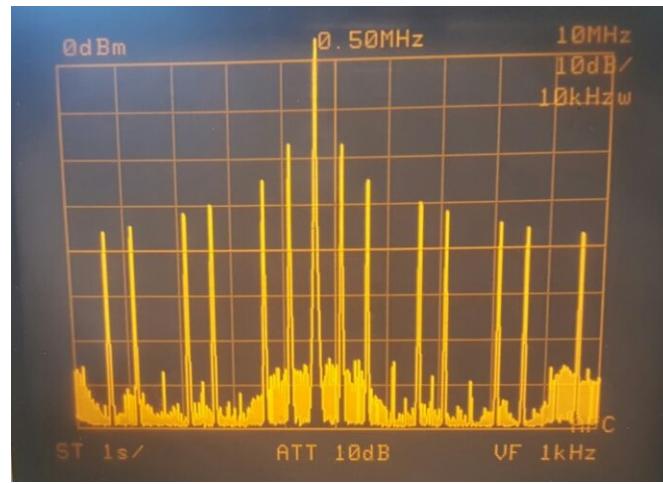


Figure 8: Espectro de la señal triangular.

Part II

Señal modulada en AM y FM

Para la modulación de señales en amplitud, se utiliza el principio heterodino, que dice que la multiplicación de dos señales sinusoidales puede ser escrita como la suma de dos señales sinusoidales, cuyas frecuencias están dadas por la suma y la diferencia de las frecuencias de las señales multiplicadas.

$$\cos(2\pi f_1 t) \cos(2\pi f_2 t) = \frac{1}{2}(\cos((f_1 + f_2)2\pi t) + \cos((f_1 - f_2)2\pi t))$$

Utilizamos, entonces

Frecuencia de la portadora : 600 kHz

Frecuencia de la modulada : 90 kHz

Existe también un índice de modulación que se define como la relación entre la máxima desviación de la frecuencia instantánea de la portadora y la frecuencia moduladora.

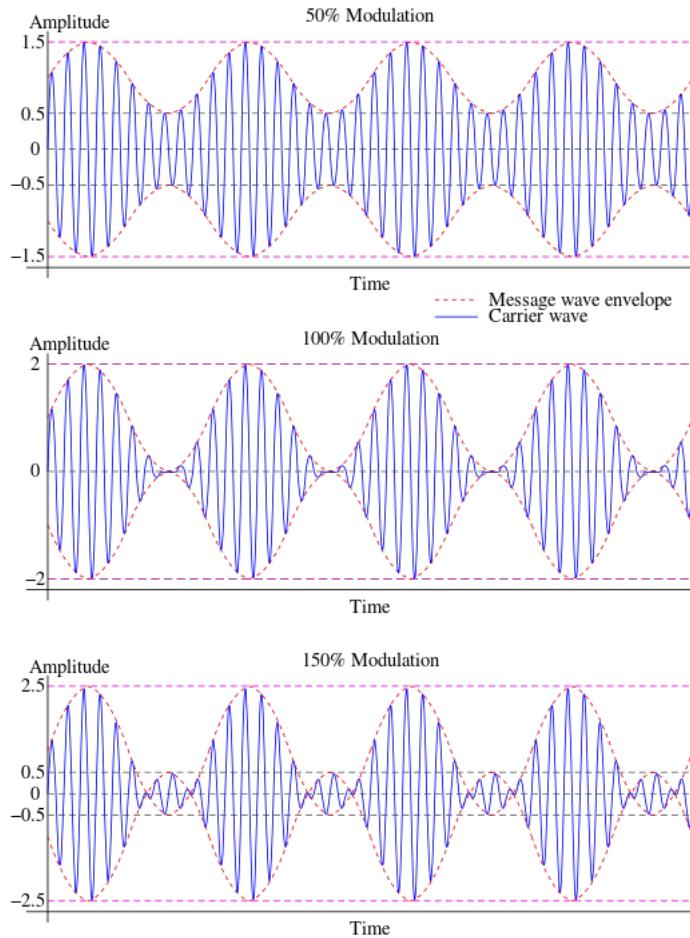


Figure 9: Modulación variable según el índice.

4 Modulación AM

4.1 Moduladora senoidal, $m = 0.5$



Figure 10: Modulacion AM con senoidal y $m = 0.5$

Se verifica, que efectivamente la señal se modula de la forma requerida.

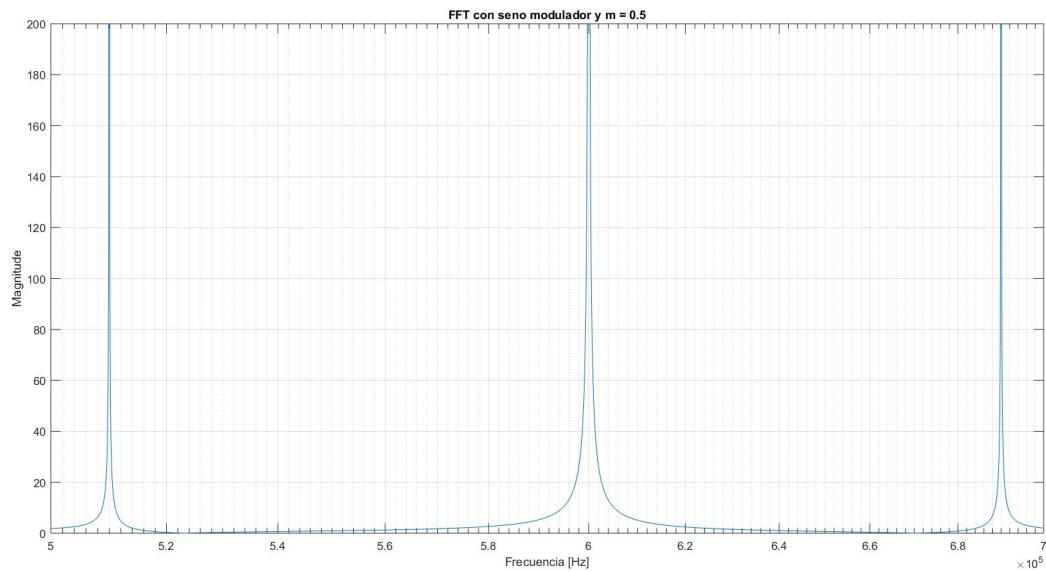


Figure 11: Simulación.

4.2 Moduladora senoidal, $m = 1$

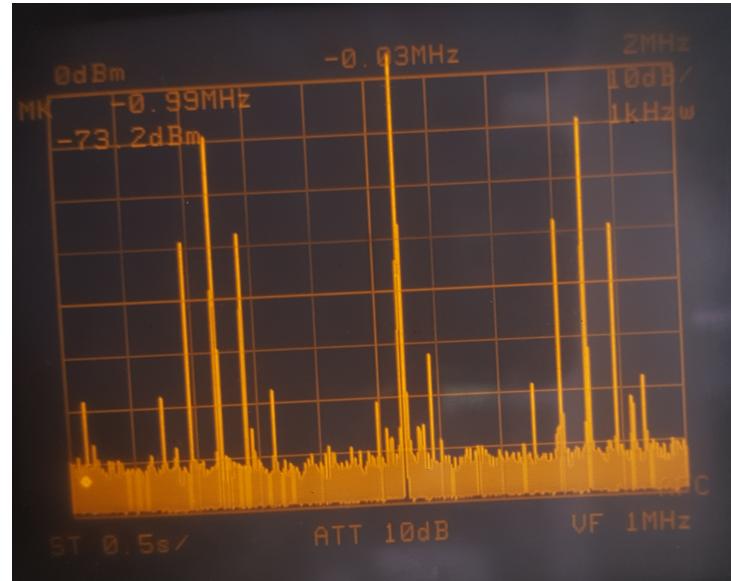


Figure 12: Modulacion AM con senoidal y $m = 0.5$

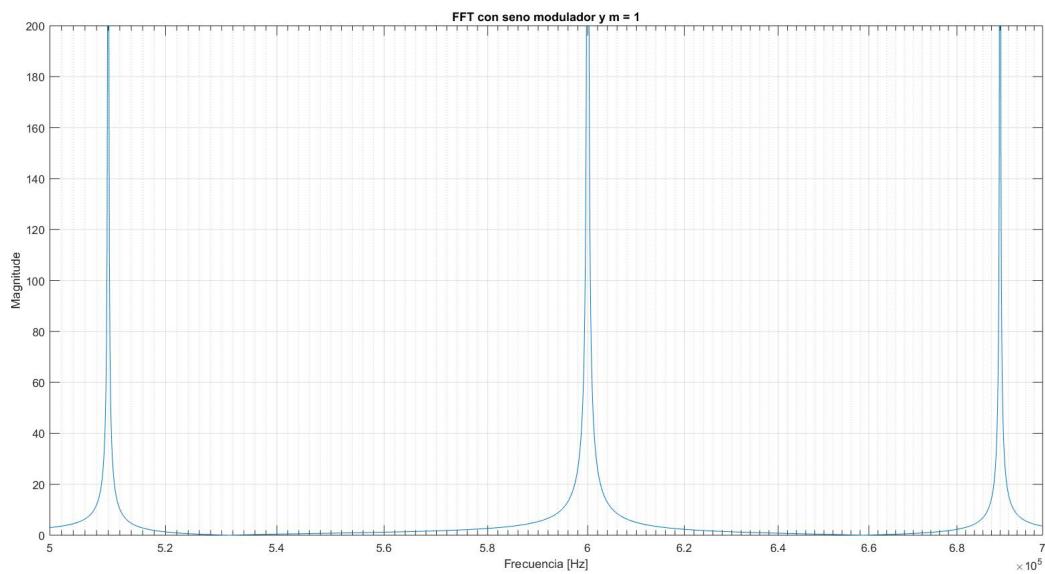


Figure 13: Simulación.

4.3 Moduladora triangular, $m = 1$

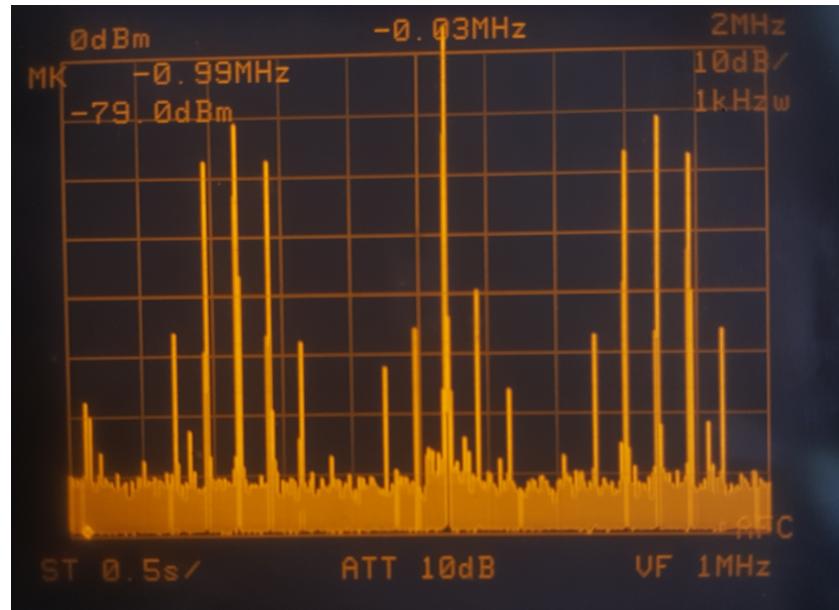


Figure 14: Modulacion AM con triangular y $m = 0.5$

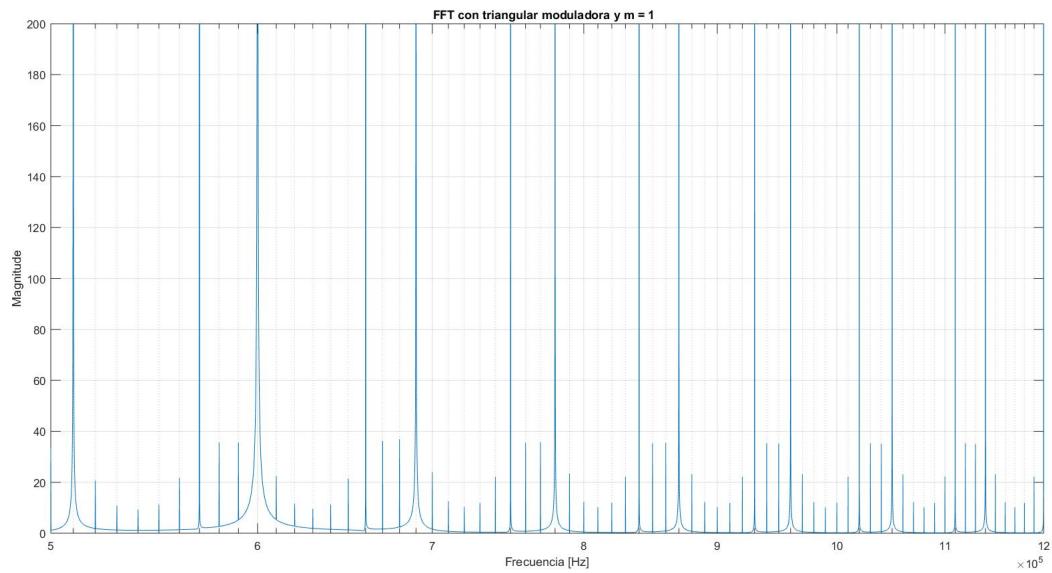


Figure 15: Simulación

4.4 Moduladora senoidal, $m = 1$, de frecuencia igual a la portadora

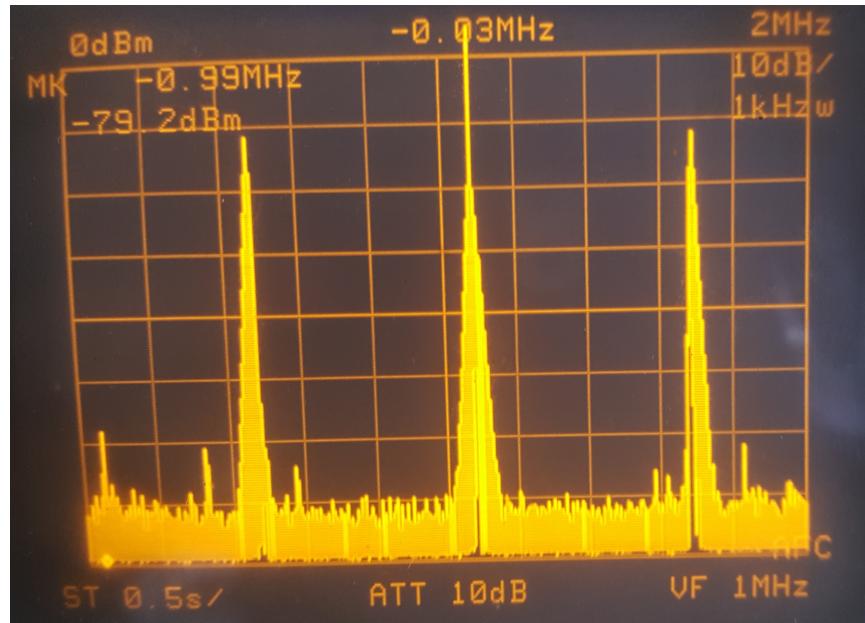


Figure 16: Modulacion AM con senoidal y $m = 0.5$,de frecuencia igual a la portadora

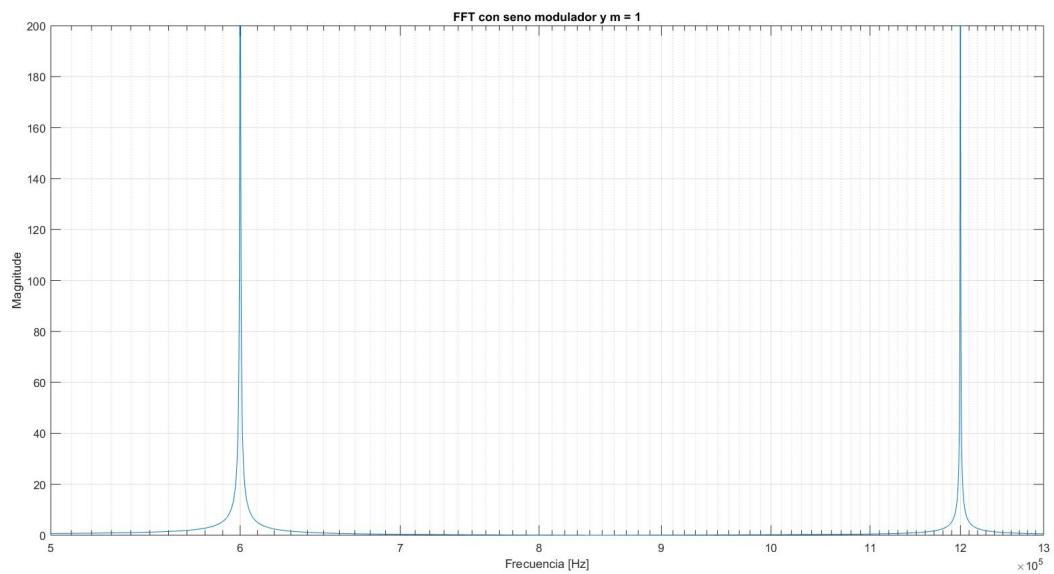


Figure 17: Simulación

5 Modulación FM

5.1 Moduladora senoidal

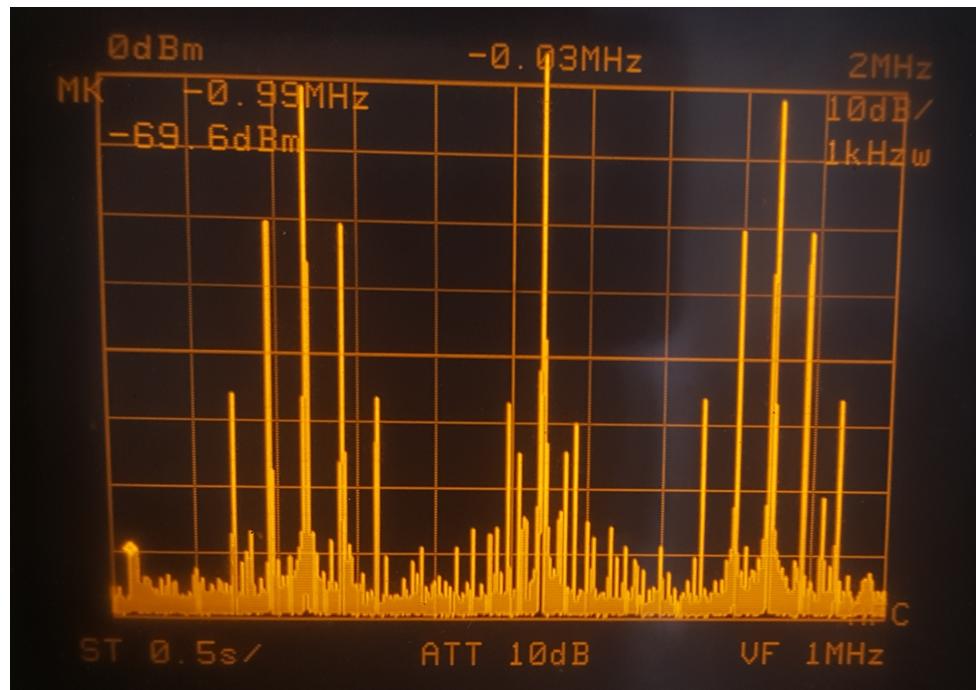


Figure 18: Espectro de la señal modulada.

5.2 Moduladora triangular

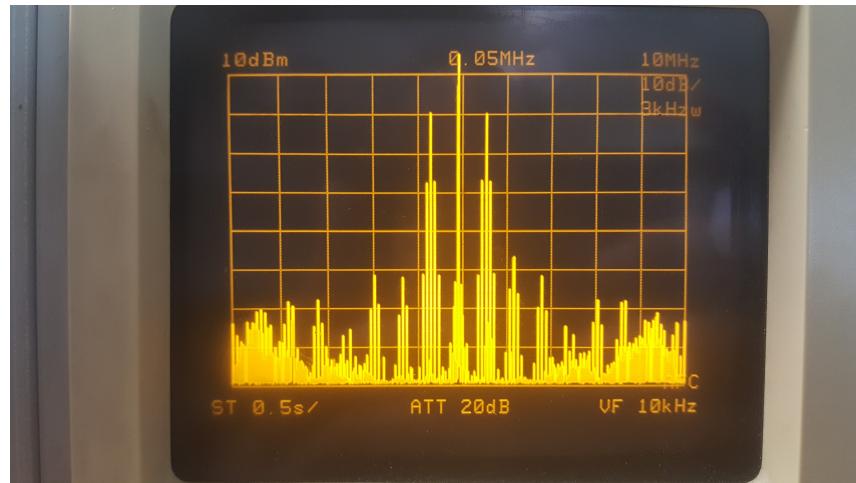


Figure 19: Espectro de la señal modulada.

5.3 Moduladora senoidal, frecuencia igual a la portadora.

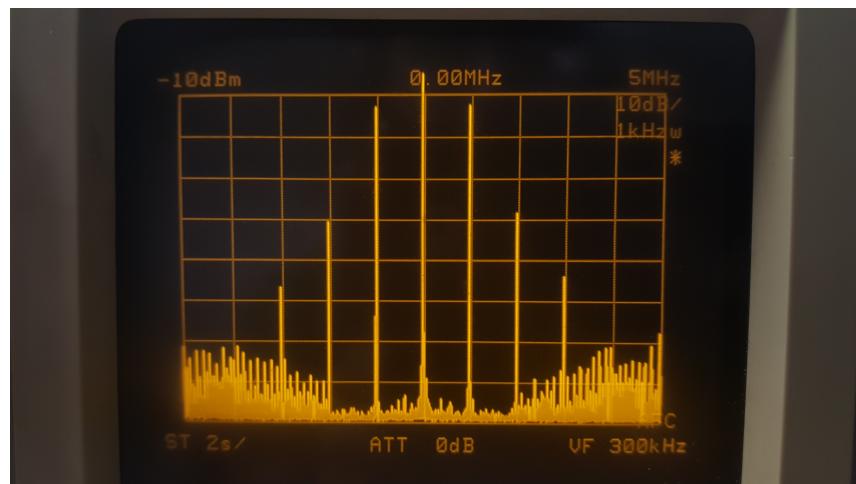


Figure 20: Espectro de la señal modulada.

Part III

Espectro de radiofrecuencias en Argentina

6 Características y utilidades

Características de propagación de las bandas de frecuencias radioeléctricas

Banda	Rango de frecuencias	Alcance	Utilización	Anchura de banda	Interferencia
Ondas miriamétricas	3-30 kHz	Miles de km	Radionavegación de largo alcance	Muy estrecha	De amplia distribución
Ondas kilométricas	30-300 kHz	Miles de km	Como las comunicaciones estratégicas en ondas miriamétricas	Muy estrecha	De amplia distribución
Ondas hectométricas	.3-3 MHz	2-3 000 km	Como las comunicaciones estratégicas en ondas miriamétricas	Moderada	De amplia distribución
Ondas decamétricas	3-30 MHz	Hasta 1000 km	Radiodifusión y punto a punto a nivel mundial	Amplia	De amplia distribución
Ondas métricas	30-300 MHz	2-300 km	Radiodifusión, PCS, Móvil, WAN	Muy amplia	Confinada
Ondas decimétricas	.3-3 GHz	<100 km	Radiodifusión, PCS, Móvil, WAN	Muy amplia	Confinada
Ondas centimétricas	3-30 GHz	Varía de 30 km a 2 000 km	Radiodifusión, PCS, Móvil, WAN, comunicaciones por satélite	Muy amplia hasta 1 GHz	Confinada
Ondas milimétricas	30-300 GHz	Varía de 20 km a 2 000 km	Radiodifusión, punto a punto, PCS y comunicaciones por satélite	Muy amplia hasta 10 GHz	Confinada

Figure 21: Cuadro de características de las ondas electromagnéticas

En Argentina, se dividen de la siguiente forma

Espectro de radio frecuencia				
Nombre	Banda	Frecuencia	Longitud de onda	Uso
		<3 Hz	>100.000 Km	
Extra baja frecuencia	ELF	3-30 Hz	100.000-10.000 Km	No se utiliza en radio frecuencia
Súper baja frecuencia	SLF	30-300 Hz	10.000-1.000 Km	Comunicaciones submarinas
Ultra baja frecuencia	ULF	300-3000 Hz	1.000-100 Km	Comunicaciones militares secretas
Muy baja frecuencia	VLF	3-30 KHz	100-10 Km	Comunicaciones militares y gubernamentales
Baja frecuencia	LF	30-300 KHz	10-1 Km	Comunicaciones aéreas y marítimas
Frecuencia media	MF	300-3000 KHz	1Km-100 m	Radiodifusión
Alta frecuencia	HF	3-30 MHz	100-10 m	Seguridad, defensa, o corta, radioaficionados
Muy alta frecuencia	VHF	30-300 MHz	10-1 m	Televisión, satélite, radio FM, Servicio marítimo, aviación
Ultra alta frecuencia	UHF	300-3000 MHz	1 m 100 mm	Televisión, radiotransmisores uso personal, Telefonía móvil, militar
Súper alta frecuencia	SHF	3-30 GHz	100-10 mm	Televisión Vía satélite, radioenlaces, radar
Extra alta frecuencia	EHF	30-300 GHz	10-1 mm	Radioastronomía, radar alta resolución
		>300 GHz	< 1 mm	

Figure 22: Distribución de radiofrecuencias según utilización.

7 Distribución de canales

Actualmente en Argentina, las frecuencias se distribuyen de la siguiente forma

Atribución	Servicio
457 kHz	Localización de víctimas en avalanchas
526,5 - 1606,5 kHz	Radiodifusión sonora en onda media (AM)
7,1 - 7,2 MHz	Radioaficionados
13,553 - 13,567 MHz	Aplicaciones ICM
Canales entre 26,2 y 27,475 MHz	Radiobúsqueda en 27 MHz
Canales entre 26,905 y 26,945 MHz	Usos de radio en embarcaciones
26,957 - 27,283 MHz	Aplicaciones ICM
26,96 - 27,41 MHz	Banda ciudadana CB-27
Canales entre 26,995 y 27,195 MHz	Usos de baja potencia en la banda ICM de 27 MHz
27,095 MHz	Eurobaliza para ferrocarriles
Canales entre 27,505 y 27,855 MHz	Servicio móvil Terrestre en 27 MHz
Canales entre 29,71 y 30,295 MHz	Usos de baja potencia en 30 MHz
Canales entre 31,025 y 40,225 MHz	Teléfono inalámbrico
Canales entre 35,03 y 35,2 MHz	Telemandos para aeromodelismo
40,66 - 40,7 MHz	Usos de baja potencia en la banda ICM de 40 MHz
40,66 - 40,7 MHz	Aplicaciones ICM en 40 MHz
Canales entre 40,875 y 40,95 MHz	Radiobúsqueda en 40 MHz
41 - 47 MHz	Ministerio de Defensa
47 - 68 MHz	Servicio Móvil terrestre
50 - 50,2 MHz	Radioaficionados
68 - 87,5 MHz	Radionavegación aeronáutica
Canales entre 71,325 y 71,775 MHz	Datos en 71 MHz
87,5 - 108 MHz	FM comercial
122 - 130,875 MHz	Usos civiles del servicio móvil aeronáutico (OR)
Canales entre 131,4 y 131,975 MHz	Compañías de transporte aéreo
135,7 - 137,8 MHz	Radioaficionados
138 - 144 MHz	Servicio móvil aeronáutico (OR) y otros
148 - 148,025 MHz	Servicios móviles de cobertura nacional

Figure 23: Distribución hasta los 148 MHz.

148 - 148,025 MHz	Servicios móviles de cobertura nacional
Canales entre 148,425 y 148,625 MHz	Radiobúsqueda de cobertura nacional
166,9 - 167,5 MHz	Empresas de servicio (electricidad)
167,5125 - 167,6 MHz	Empresas de servicio (gas)
Canales entre 170,8 y 171,325 MHz	Servicio móvil terrestre de cobertura nacional
171,5 - 172,1 MHz	Empresas de servicio (electricidad)
172,1125 - 172,2 MHz	Empresas de servicio (gas)
174 - 181 MHz	Enlaces móviles de transporte de programas de radiodifusión
181 - 188 MHz	Enlaces móviles y unidireccionales de transporte de programas de radiodifusión
188 - 195 MHz	Enlaces unidireccionales móviles para transporte de programas de radiodifusión
195 - 223 MHz	Radiodifusión sonora digital en VHF
235 - 399,9 MHz	Ministerio de Defensa
402 - 405 MHz	Implantes médicos
406,1 - 430 MHz	Servicios de Fijo y móvil
Canal: 407,7 MHz	Telemundos y usos generales
415,3 - 415,8 MHz	Empresas de servicio (electricidad)
425,3 - 425,8 MHz	Empresas de servicio (electricidad)
433,05 - 434,79 MHz	Aplicaciones de baja potencia en banda ICM
440 - 470 MHz	Servicios de Fijo y móvil
446 - 446,1 MHz	PMR446
446,1 - 446,2 MHz	PMR446 Digital
447,55 - 448,65 MHz	Transporte ferroviario GSM-R
457,6 - 458,6 MHz	Transporte ferroviario GSM-R
Canales entre 461,3 y 461,825 MHz	Aplicaciones ICM
470 - 830 MHz	Televisión analógica y digital (TDT)
830 - 862 MHz	Televisión digital (TDT)
862 - 868 MHz	Transporte de programas estudio-emisora de radiodifusión sonora
865 - 868 MHz	RFID
870 - 871 MHz	Teléfono inalámbrico (CT1-E) ¹⁸
870 - 876 MHz	Sistemas de comunicaciones móviles en grupo cerrado de usuarios
880 - 915 MHz	Sistema de telefonía móvil automática GSM

Figure 24: Distribución hasta 1 GHz desde 148 MHz.

8 Espectro electromagnético en la banda de FM

En Argentina, se establecen dos categorías de emisoras¹. Las de alta y mediana potencia (categorías A, B, C y D), y las de baja potencia (E, F y G).

Esto permite asignar mayor cantidad de estas estaciones al reducirse notoriamente las distancias de compartición.

8.1 Distribución de canales

La banda para este servicio, comprendida entre 88 y 108 MHz, se divide en 100 canales de 200 kHz cada uno.

El primer canal, el canal 200, tiene una frecuencia de 88.1 MHz y el último canal, el canal 300, tiene una frecuencia de 107.9 MHz.

¹Según la norma técnica del Servicio de FM (Resolución N° 142 SC/96)

8.2 Categoría de las estaciones

La categoría de una estación queda determinada por el área de servicio estimada. Se considera como límite de la misma, el contorno de $48 dB\mu/m$ ($250 \mu V/m$). Los cálculos se realizan conforme a la metodología establecida en el capítulo 4 de la presente.

Con el equipamiento máximo correspondiente a las diferentes categorías, los radios del área estimada de servicio son los siguientes:

Categoría	Radio de área estimada ($48 dB\mu V/m - 250 \mu V/m$) en Km
A	90
B	80
C	70
D	45
E	28
F	22
HG	9.5

Table 1: Tabla de categorías y alcance.

8.3 Sintonización de una emisora FM con el analizador de espectro

Se procedió a sintonizar con el analizador de espectro una emisora de radio FM.



Figure 25: Sintonización de la emisora FM $105.5 MHz$

Se conectaron auriculares a la salida del analizador y se pudo escuchar la radio de esa frecuencia.

9 Espectro electromagnético de TV

En argentina, se divide en tres bandas de canales

Banda	Canales
I	2 - 6
II	7 - 13
III	21 - 69

Table 2: Tabla de bandas y canales

Comienza en el canal 2, con $54 - 60\text{ Mhz}$, hasta el canal 69 con $800 - 806\text{ MHz}$ ².

9.1 Potencia en bandas de TV

Según si la estación emisora es una estación principal, secundaria o menor, la potencia emitida varía, variando así el alcance de la misma para las bandas I y II. La banda III se divide en categorías de la A a la F, donde la A es de televisión abierta, la B y C son para televisión abierta y codificada, y la D, E y F son de televisión codificada.

Categoría	Radio de área estimada ($40\text{dB}\mu\text{V}/\text{m} - 100\mu\text{V}/\text{m}$) en Km
Principal	85
Secundaria	60
Menor	40
Local	10

Table 3: Tabla de potencias para la banda I.

Categoría	Radio de área estimada ($50\text{dB}\mu\text{V}/\text{m} - 316\mu\text{V}/\text{m}$) en Km
Principal	75
Secundaria	55
Menor	40
Local	10

Table 4: Tabla de potencias para la banda II.

Categoría	Radio de área estimada ($60\text{dB}\mu\text{V}/\text{m} - 1000\mu\text{V}/\text{m}$) en Km
A	60
B	40
C	25

Table 5: Tabla de potencias para la banda III.

²El canal 37 (608 a 614 MHz) corresponde a Radioastronomía, razón por la cual no se asigna para este tipo de servicio.

9.2 Potencia en bandas de STVC

El STVC es aquel cuyas emisiones están destinadas a la recepción, previa decodificación, por parte del público abonado al sistema. Solo está disponible para la tercer banda.

Categoría	Radio de área estimada ($60dB\mu V/m - 1000\mu V/m$) en Km
B	40
C	25
D	15
E	10
F	6

Table 6: Tabla de potencias para la banda III.

Part IV

Transformada de Fourier del sinc y del tren de deltas

En esta etapa, se procederá a verificar si, al conectarle como entrada un sinc y un tren de deltas, observaremos sus respectivas Transformadas de Fourier.

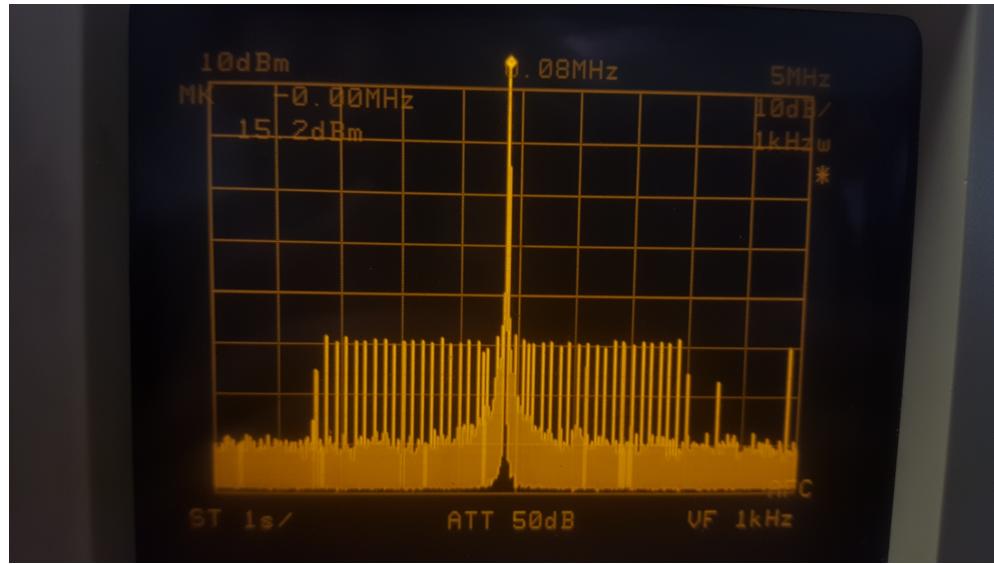


Figure 26: Transformada de Fourier del sinc.

En el caso del sinc, se verifica que efectivamente el analizador muestra la transformada del mismo.

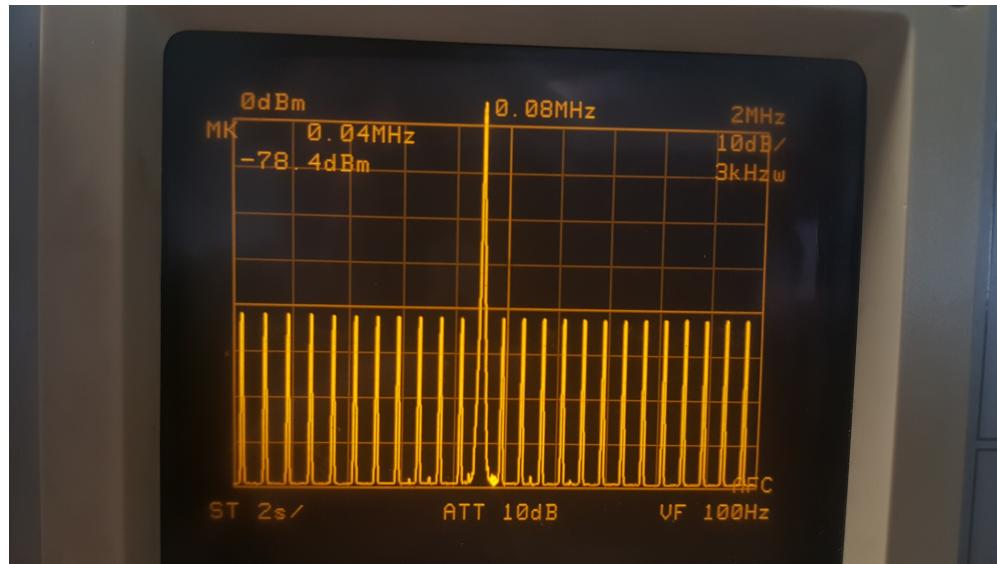


Figure 27: Transformada de Fourier del tren de deltas.

Análogamente, se comprueba que el analizador muestra la transformada del tren de deltas.

Part V Conclusión

Para concluir, observamos la enorme cantidad de funcionalidades que posee el analizador, que nos permitió sincronizar radiofrecuencias y comprobar, al ingresarle señales, que su espectro coincide con el calculado mediante la transformada de Fourier. Esta información adicional es importante para poder realizar distintos análisis a los que nos permite hacer el osciloscopio.