

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL CÓRDOBA

INGENIERÍA ELECTRÓNICA



MEDIDAS ELECTRÓNICAS I

Trabajo Práctico de Laboratorio N°11

ANÁLISIS DE SEÑALES CON OSCILOSCOPIOS DIGITALES

ALUMNOS : Carreño Marin, Sebastian 83497
 Juarez, Daniel 79111
 Torres, Heber 84640

CURSO : 4R1

DOCENTES : Ing. Centeno, Carlos
Ing. Salamero, Martín
Ing. Guanuco, Luis

CÓRDOBA, ARGENTINA

6 de octubre de 2022

CONTENIDO

1. Introducción	2
2. Marco Teórico	2
3. Actividad Práctica	3
3.1. Análisis de una forma de onda cuadrada	3
3.2. Análisis de un tren de pulsos	3
3.3. Observación de frecuencias producto del aliasing	4
3.3.1. Aliasing con señal senoidal	4
3.3.2. Aliasing con señal cuadrada	5
3.4. Análisis de una señal modulada en amplitud	7
3.4.1. Señal senoidal como modulante	7
3.4.2. Señal cuadrada como modulante	10
3.4.3. Señal triangular como modulante	11
3.5. Observación de los productos de IMD de tercer orden	13
3.6. Análisis de una señal modulada en frecuencia	16
3.7. Análisis de la distorsión armónica producida por un amplificador	21
4. Conclusiones	26

1. Introducción

Algunos osciloscopios digitales poseen un módulo matemático, el cual incluye la *Transformada Rápida de Fourier* (FFT). Esta herramienta permite analizar señales en el dominio de la frecuencia, lo cual es útil en determinadas ocasiones. Por otro lado, estos osciloscopios otorgan utilidades en los menú de medidas, que permiten caracterizar de forma rápida la señal en cuestión. Todos estos detalles son tratados en el presente informe.

2. Marco Teórico

3. Actividad Práctica

Se propone como actividad realizar el análisis de distintas señales en la frecuencia con el uso del módulo matemático de un osciloscopio digital, mediante la FFT. Con este objetivo, los instrumentos e insumos necesarios son:

- Osciloscopio digital Tektronix TDS 1001
- 2 generadores de señal Goldstar FG-8002
- Multímetro RMS MARCA Y MODELOOOOOOO
- Circuito modulador de amplitud con diodo y circuito sintonizado
- Potenciómetro de $1\ k\Omega$

3.1. Análisis de una forma de onda cuadrada

3.2. Análisis de un tren de pulsos

3.3. Observación de frecuencias producto del aliasing

El *aliasing* es un fenómeno que produce componentes de frecuencia falsas, es decir, que nos son propias de la señal que se desea medir. Esto, en los osciloscopios digitales, ocurre cuando la velocidad de muestreo que se utiliza es insuficiente, es decir, muy baja, para la señal que se desea medir.

Por el teorema del muestreo se sabe que la velocidad de muestreo debe ser, como mínimo, el doble de la frecuencia máxima de la señal a ser medida.

3.3.1. Aliasing con señal senoidal

Con el uso de uno de los generadores se setea una señal **senoidal** de frecuencia $f = 10 \text{ kHz}$, y una amplitud acorde a la mitad del valor posible, ya que no es algo crítico. Luego, con el menú matemático se eligen las opciones **FFT**, **CH1**, **Hanning** y **Zoom x1**. Además, la velocidad de muestreo se setea en $f_s = 25 \text{ kSa/s}$. En la Figura 1 se puede observar que la señal es correctamente muestreada, ya que se logra ver su componente de frecuencia.

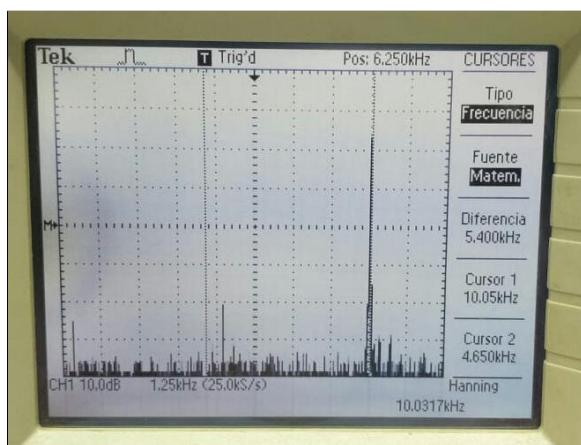


Figura 1: Espectro de señal senoidal de 10 kHz.

Ahora, se procede a cambiar la frecuencia de la señal que se desea medir, y se logra ver que a partir de la frecuencia $f = 12,5 \text{ kHz}$ empiezan a haber frecuencias falsas. Este efecto es esperable, ya que la velocidad de muestreo elegida cumple con el teorema de muestreo solo para señales senoidales cuya frecuencia, como máximo, sea la mencionada en este párrafo.



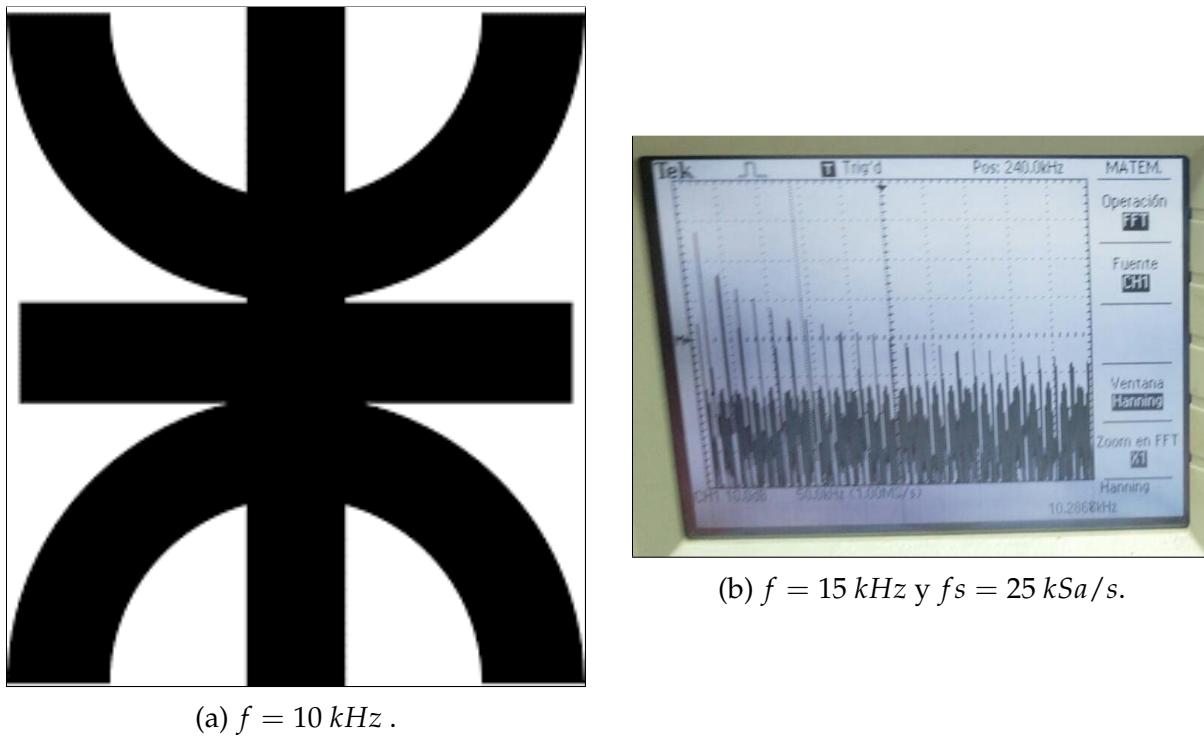
(a) $f = 12,5 \text{ kHz}$ y $fs = 25 \text{ kSa/s}$.

(b) $f = 15 \text{ kHz}$ y $fs = 25 \text{ kSa/s}$.

Figura 2: Espectro de señales con aliasing.

3.3.2. Aliasing con señal cuadrada

Se procede a hacer la misma experiencia anterior, pero con una señal cuadrada de $f = 10\text{kHz}$. Su forma en el tiempo y su espectro se puede ver en la Figura 3.

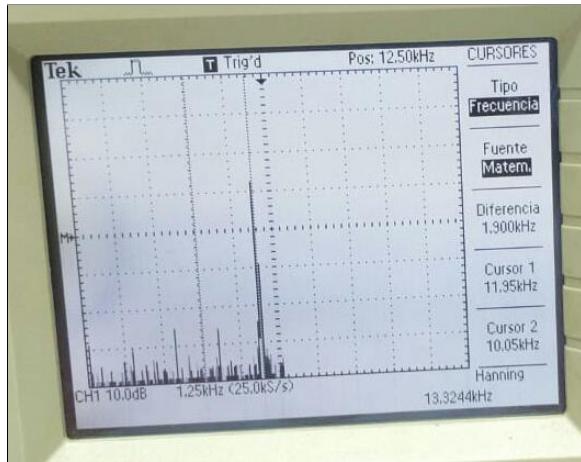


(a) $f = 10 \text{ kHz}$.

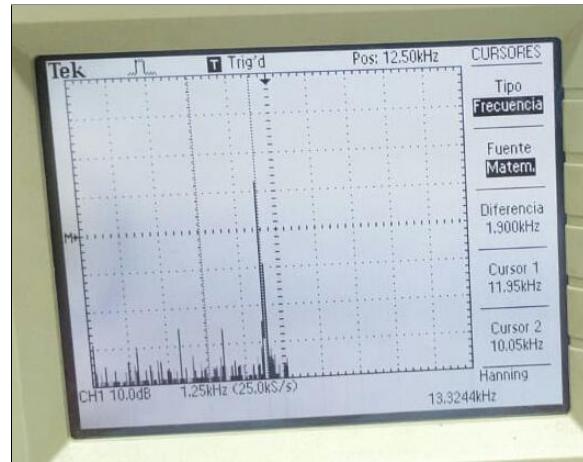
(b) $f = 15 \text{ kHz}$ y $fs = 25 \text{ kSa/s}$.

Figura 3: Espectro de señales con aliasing.

Luego, se procede a aumentar la frecuencia de la señal del generador, y también se logra ver los efectos del aliasing. En la Figura 4 se muestra lo mencionado.



(a) $f = 12.5 \text{ kHz}$ y $fs = 25 \text{ kSa/s}$.



(b) $f = 15 \text{ kHz}$ y $fs = 25 \text{ kSa/s}$.

Figura 4: Espectro de señales con aliasing.

3.4. Análisis de una señal modulada en amplitud

Las señales que son moduladas en amplitud (AM) poseen un espectro característico, como el que se puede ver en la Figura 5. Mediante el espectro se puede medir frecuencia, pero también las amplitudes, de portadora y bandas laterales, lo que permite calcular el índice de modulación, el cual es un parámetro importante a tener en cuenta.

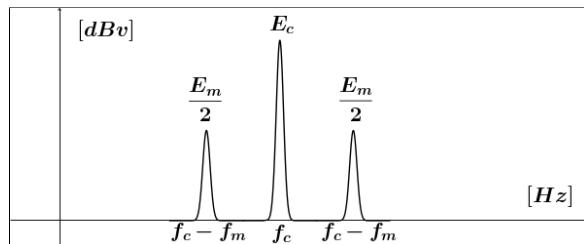


Figura 5: Ejemplo de espectro de una señal AM.

Recordando que el índice de modulación es $m = E_m / E_c$, y además, que el módulo matemático del osciloscopio en cuestión mide las amplitudes en dBv, entonces

$$m = \frac{E_{BLateral} \cdot 2}{E_{Portadora}} \implies m_{dB} = dBv_{BLateral} - dBv_{Portadora} + 6dB \quad (1)$$

$$\therefore m = 10^{\frac{m_{dB}}{20}} \quad (2)$$

Para poder visualizar el espectro de una señal AM se utiliza el circuito de la Figura 6. El mismo posee una circuito sintonizado o resonante, el cual está diseñado para que su frecuencia sea de $f_0 = 50 \text{ kHz}$.

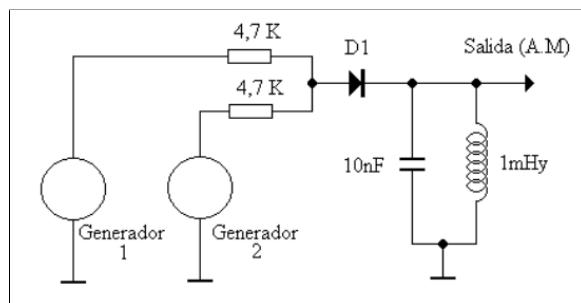
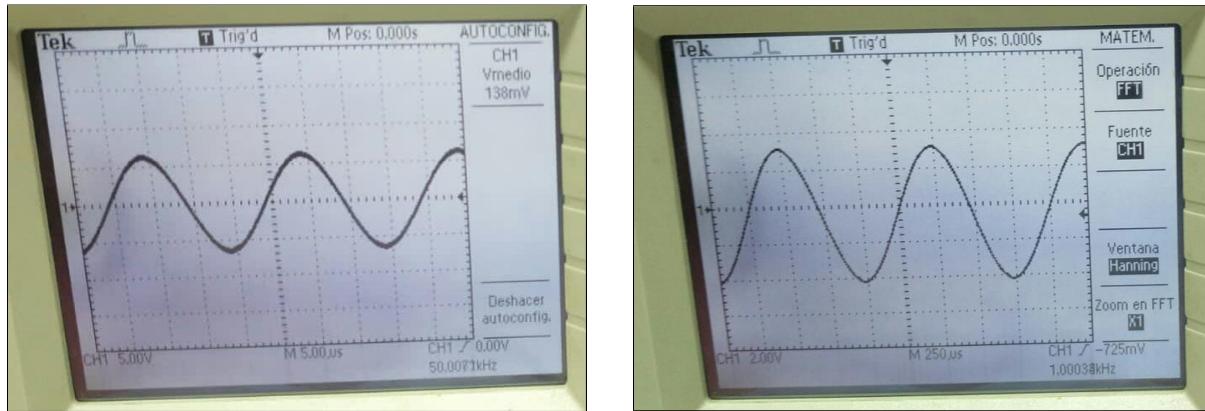


Figura 6: Circuito de modulación en amplitud.

Con el generador **G1** se inyecta una señal senoidal que actúa como **portadora** de frecuencia $f_c = 50 \text{ kHz}$, y con el generador **G2** se inyecta la señal **modulante** de frecuencia $f_m = 1 \text{ kHz}$, que puede ser senoidal, triangular o cuadrada. Las amplitudes utilizadas mantienen una relación tal que la de la portadora sea el doble que la de modulante.

3.4.1. Señal senoidal como modulante

Se setea el generador G2 para que entregue una señal senoidal, que actúa como banda base. Dicha señal y la portadora se pueden ver en la Figura 7.



(a) Portadora.

(b) Banda base senoidal.

Figura 7: Señales utilizadas para modular en amplitud,

Se elige una base de tiempos de **1 ms/div** y luego, el menú del trigger se setea de la siguiente manera: **Flanco positivo, CH1, Auto, Rechazo AF**. Con todo esto, la imagen obtenida se encuentra en la Figura 8.

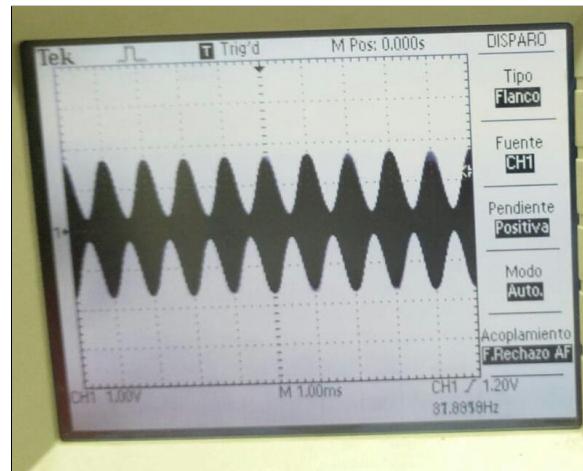


Figura 8: Señal AM con seno como modulante.

Luego, en el menú matemático se eligen las siguientes opciones: **FFT, CH1, Hanning** y **Zoom x10**. Además, el modo de adquisición se pone en **Promedio** con 64 cuentas. A continuación, mediante el uso de cursos, se procede a medir la frecuencias. Dichas mediciones se pueden apreciar en la Figura 9, y los valores se encuentran tabulados en la Tabla 1.



(a) Frecuencia BLInf.

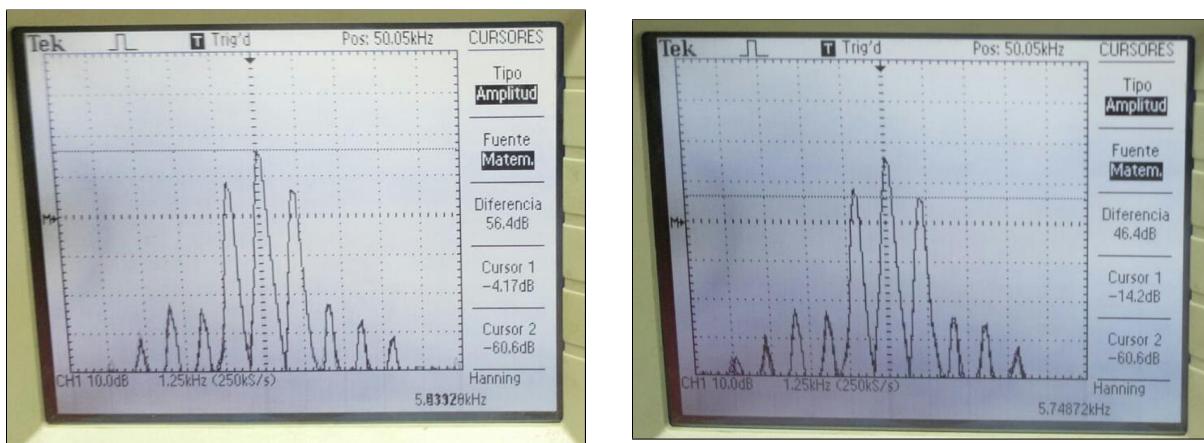
(b) Frecuencia BLSup.

Figura 9: Frecuencias de la señal AM con el seno como modulante.

f_c	f_{BLSup}	f_{BLInf}	f_m
50,05 kHz	51,10 kHz	49,10 kHz	1,05 kHz

Tabla 1: Frecuencias medidas del espectro de la señal AM.

De la misma forma, se procede a realizar mediciones de amplitud de la señal AM en cuestión. En la Figura 10 se pueden observar dichas mediciones. Luego, con estas y el uso de las ecuaciones (1) y (2), se completa la Tabla 2.



(a) Amplitud BLInf.

(b) Amplitud BLSup.

Figura 10: Amplitudes de la señal AM con el seno como modulante.

Ampl. BLInferior	Ampl. Portadora	Índice m	Índice m
48,4 dBv	56,4 dBv	-2 dB	0,79

Tabla 2: Amplitudes medidas e índice de modulación.

3.4.2. Señal cuadrada como modulante

A continuación, se procede a cambiar el generador **G2** para que inyecte una la señal cuadrada como **modulante** con la misma frecuencia antes utilizada, respetando la relación de amplitudes previamente configurada. La señal AM obtenida se puede ver en la Figura 11.

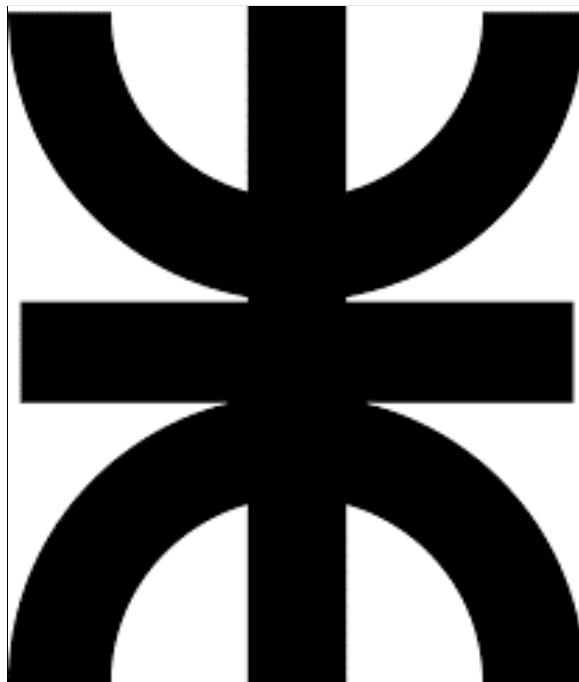


Figura 11: Señal AM con onda cuadrada como modulante.

Finalmente, se hace uso de las distintas ventanas que posee el menú matemático, para ver la diferencia entre cada presentación del espectro de la señal AM en cuestión. En la Figura 12 se puede apreciar lo mencionado.

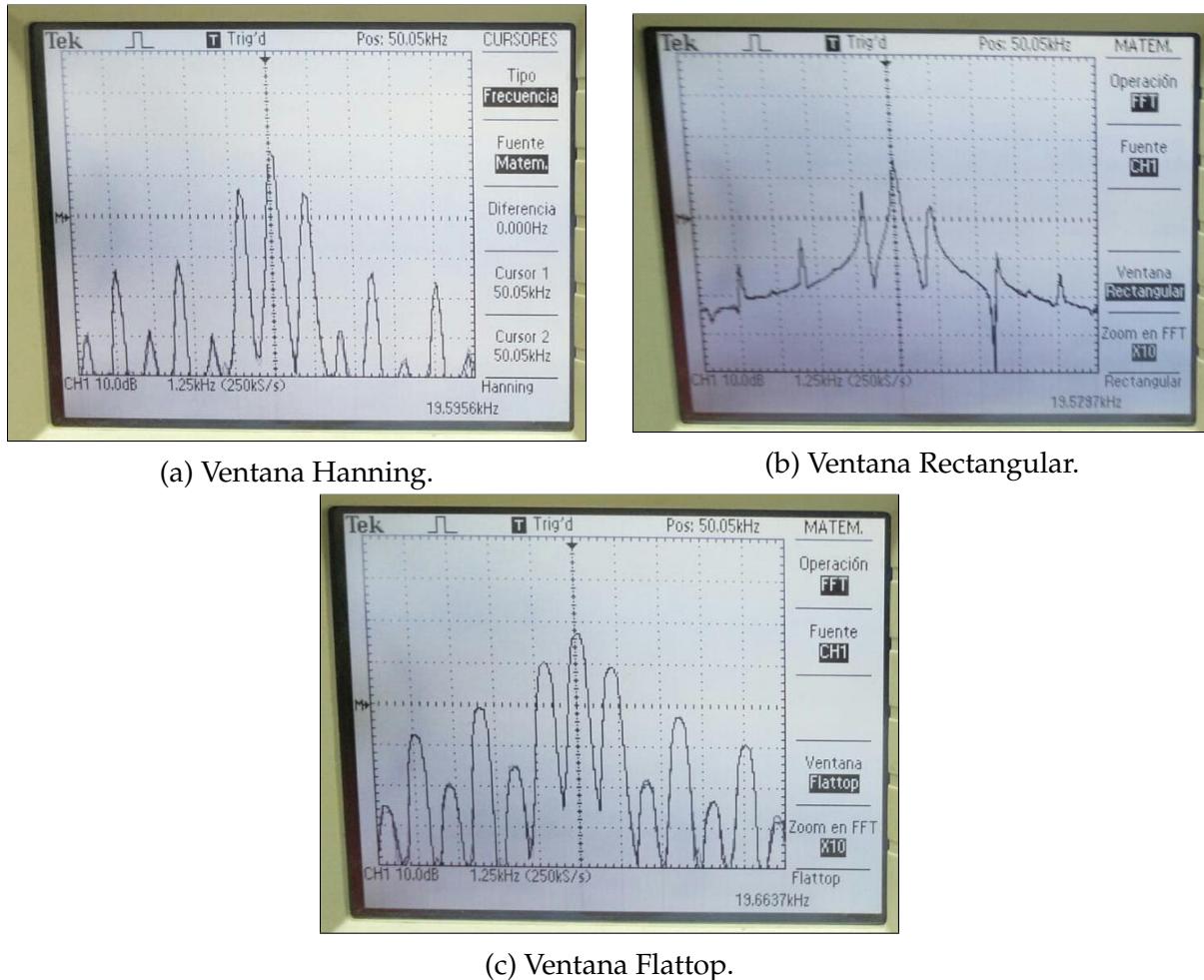


Figura 12: Distintas ventanas de una señal AM con onda cuadrada como modulante.

3.4.3. Señal triangular como modulante

De la misma forma que en la sección anterior, se procede a cambiar el generador G2 para que inyecte una señal triangular como **modulante** con la misma frecuencia antes utilizada, respetando la relación de amplitudes previamente configurada. La señal AM obtenida se puede ver en la Figura 13.

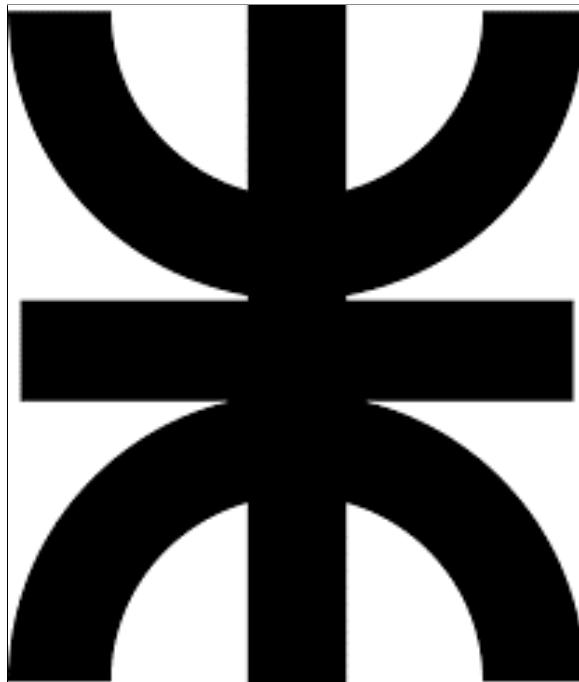


Figura 13: Señal AM con onda triangular como modulante.

Finalmente, se hace uso de las distintas ventanas que posee el menú matemático, para ver la diferencia entre cada presentación del espectro de la señal AM en cuestión. En la Figura 14 se puede apreciar lo mencionado.

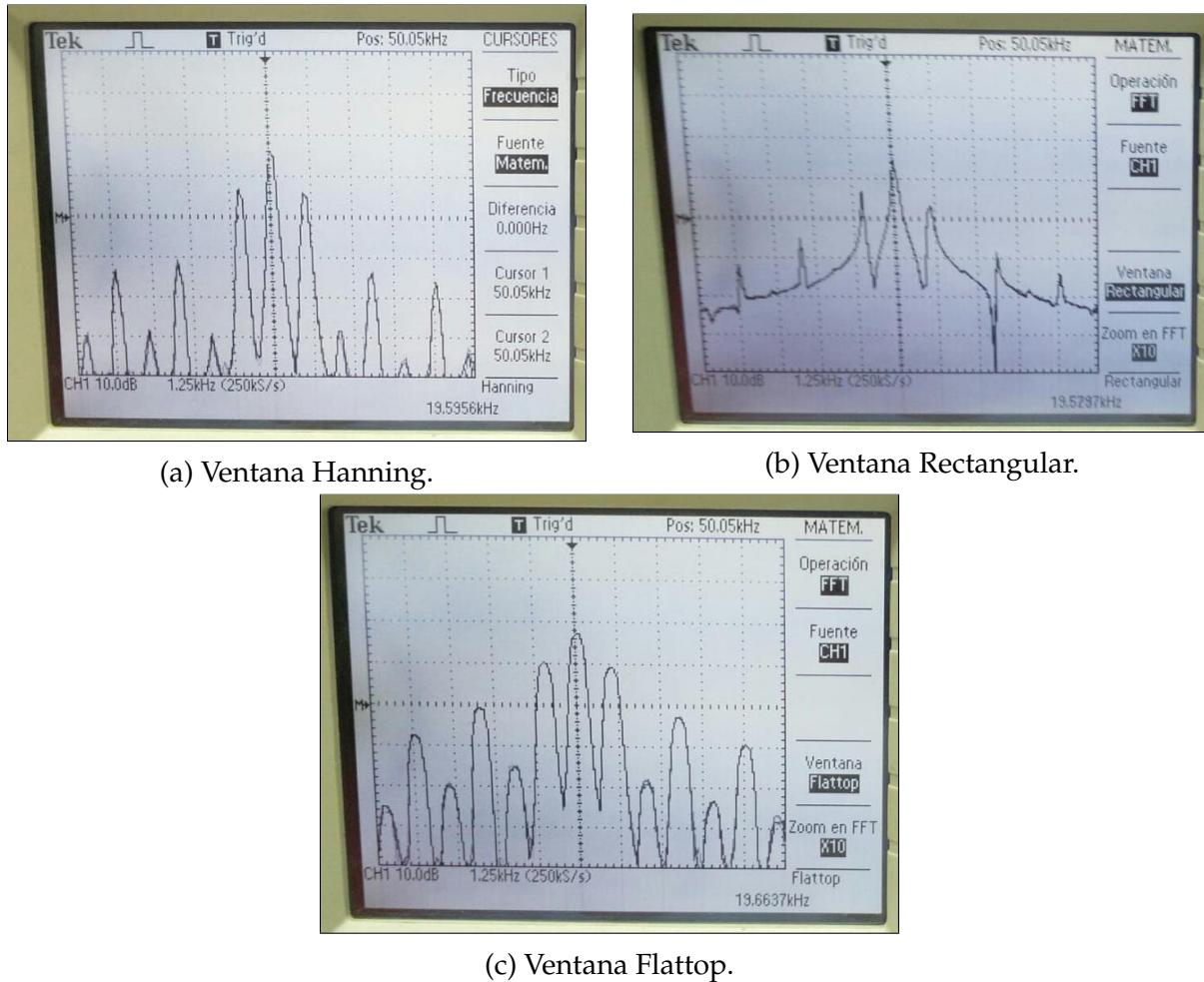


Figura 14: Distintas ventanas de una señal AM con onda triangular como modulante.

3.5. Observación de los productos de IMD de tercer orden

En la experiencia anterior se hace uso de un diodo para poder generar la modulación de amplitud. El circuito en cuestión se puede ver en la Figura 6 de la Sección 3.4.

Este dispositivo tiene un comportamiento alineal, el cual se puede modelar de la siguiente forma

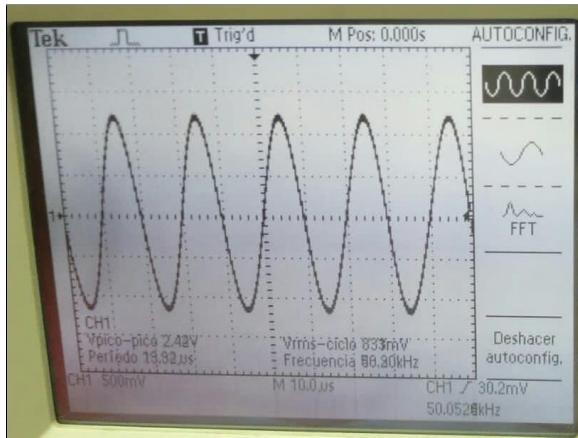
$$v_{AM} = k_a(v_{G1} + v_{G2}) + k_b(v_{G1} + v_{G2})^2 + k_c(v_{G1} + v_{G2})^3 + \dots$$

donde es de especial interés la región cuadrática de este dispositivo, ya que, debido a este, se obtiene la modulación de amplitud buscada. Si se desarrolla el término correspondiente (el cuadrático), se logra justificar lo mencionado

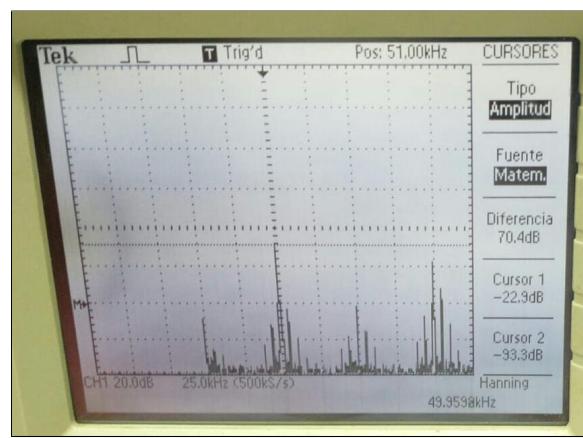
$$v_{AM} = \dots + k_b(v_{G1}^2 + 2 \cdot v_{G1}v_{G2} + v_{G2}^2) + \dots .$$

Por el contrario, las **alinealidades de orden superior** dan como resultado **productos de intermodulación (IMD)**, los cuales son efectos no deseados. La alinealidad más importante suele ser la IMD de tercer orden, por lo cual, ahora se procede a determinar el **rechazo de IMD de tercer orden** del circuito modulador utilizado.

Para ello, se setean ambos generadores **G1** y **G2** a una frecuencia de **f=50 kHz**, y a **igual amplitud**. Luego, se observan las señales de salida del circuito dejando un solo generador encendido. Los resultados se encuentran en las Figuras 15 y 16.

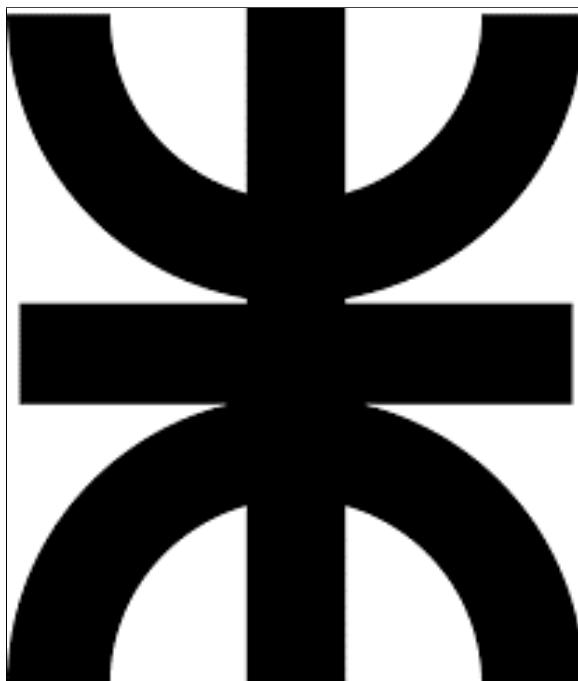


(a) En tiempo.

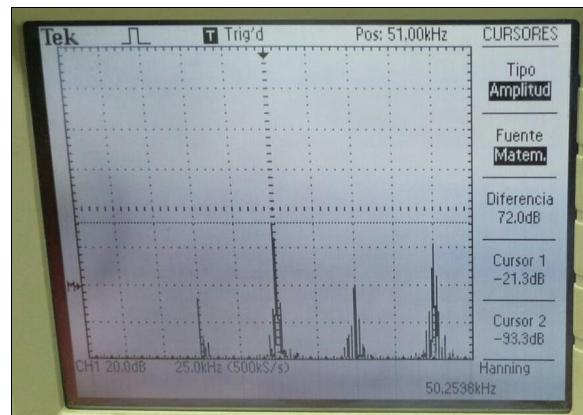


(b) En frecuencia.

Figura 15: Salida del circuito con el generador G1 encendido.



(a) En tiempo.



(b) En frecuencia.

Figura 16: Salida del circuito con el generador G2 encendido.

A continuación, se encienden ambos generadores y se ajusta el tiempo de muestreo y se habilita el **Zoom x10** para obtener una mejor visualización. Luego, se procede a separar ambas señales un ancho de $\Delta f = 2 \text{ kHz}$, quedando una de ellas en $f_1 = 49 \text{ kHz}$ y la otra en $f_2 = 51 \text{ kHz}$. En la Figura 17 se puede ver lo explicado en este párrafo.

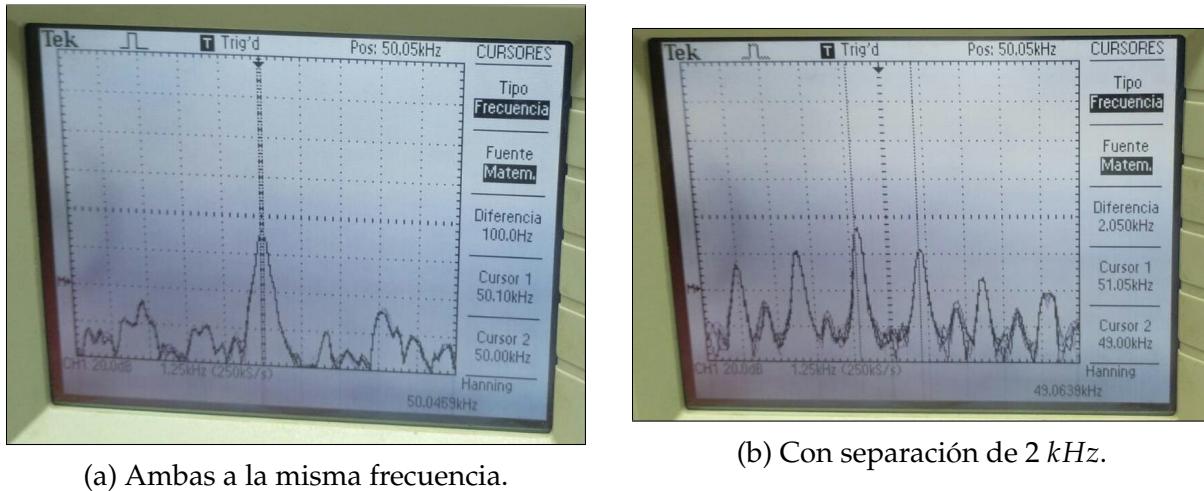


Figura 17: Espectro de la señal de salida con ambas señales inyectadas al circuito.

Las componentes de **47 kHz** ($2f_1 - f_2$) y **53 kHz** ($2f_2 - f_1$) son los productos de IMD de tercer orden. Para obtenerlos se realiza la diferencia en amplitud entre estas y f_1 y f_2 respectivamente. Dichas mediciones, realizadas con la ventana **Hanning**, se pueden ver en la Figura 18.

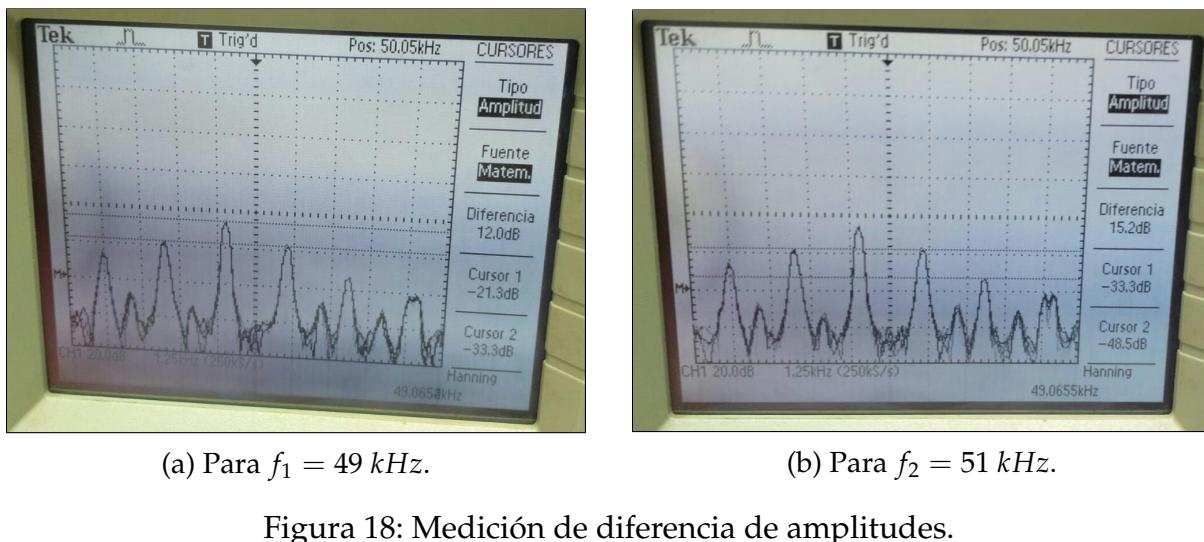


Figura 18: Medición de diferencia de amplitudes.

Los valores obtenidos de esta experiencia se encuentran tabulados en la Tabla 3.

f_1	f_2	$2f_1 - f_2$	$2f_2 - f_1$	Rechazo IMD 3°
49 kHz	51 kHz	47 kHz	53 kHz	15,2 dB

Tabla 3: Valores obtenidos para la medición del rechazo de IMD de 3°.

3.6. Análisis de una señal modulada en frecuencia

Para la presente experiencia, se emplean los generadores utilizados anteriormente, ya que poseen un **VCO** (oscilador controlado por tensión), con el cual se pretende generar una señal FM realizando el conexiónado de la Figura 19.

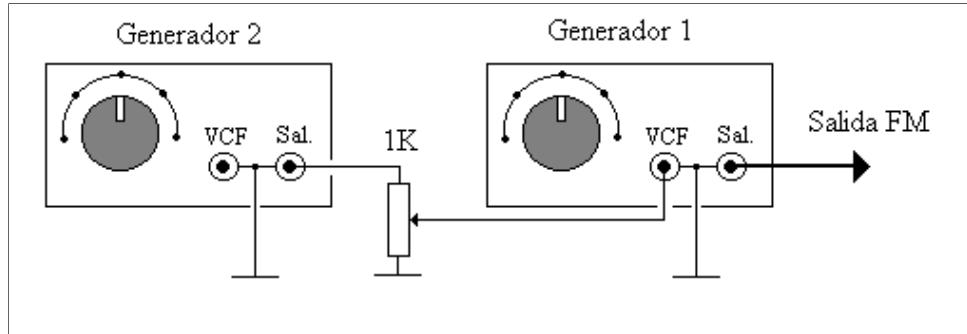
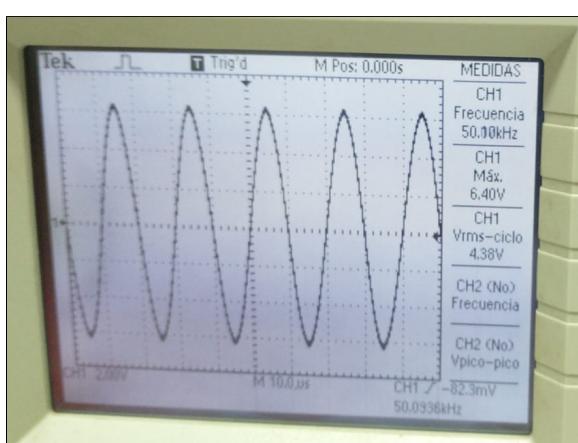
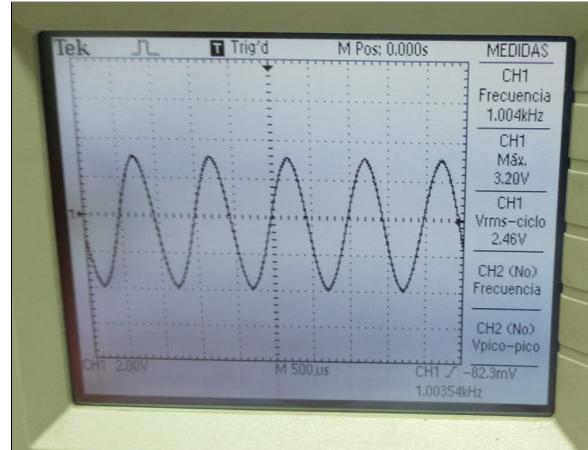


Figura 19: Conexión de los generadores.

Inicialmente, se procede a ajustar los generadores. La frecuencia de G1 se establece en 50 kHz , y se gira el control de amplitud media vuelta. Por otro lado, se ajusta la frecuencia de G2 a 1 kHz . El seteo de los generadores se observa en la Figura 20.



(a) Calibración el primer generador (G1).



(b) Calibración del segundo generador (G2).

Figura 20: Calibración de los generadores.

Luego se procede a configurar el osciloscopio. Se coloca la base de tiempos en 1 ms/div , con el control SEC/DIV, como muestra la Figura 21.

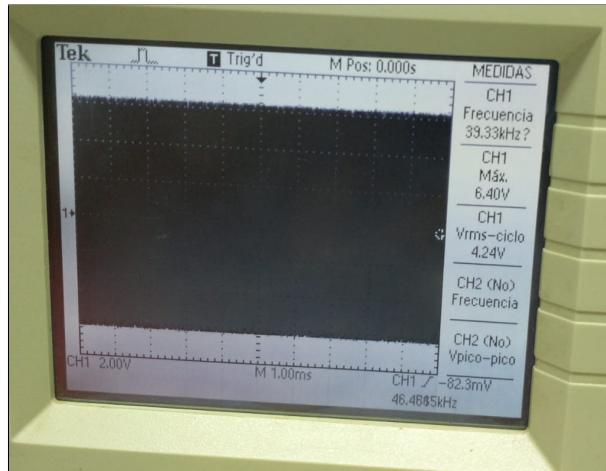


Figura 21: Señal modulada en frecuencia con base de tiempos de 1 ms.

Siguiendo el procedimiento, se configura el **MATH MENU** de la siguiente manera **Hanning**, **Zoom X10**, y modo adquisión **Promedio** en **64** muestras. La salida FM configurada, se observa en frecuencia en la Figura 22.

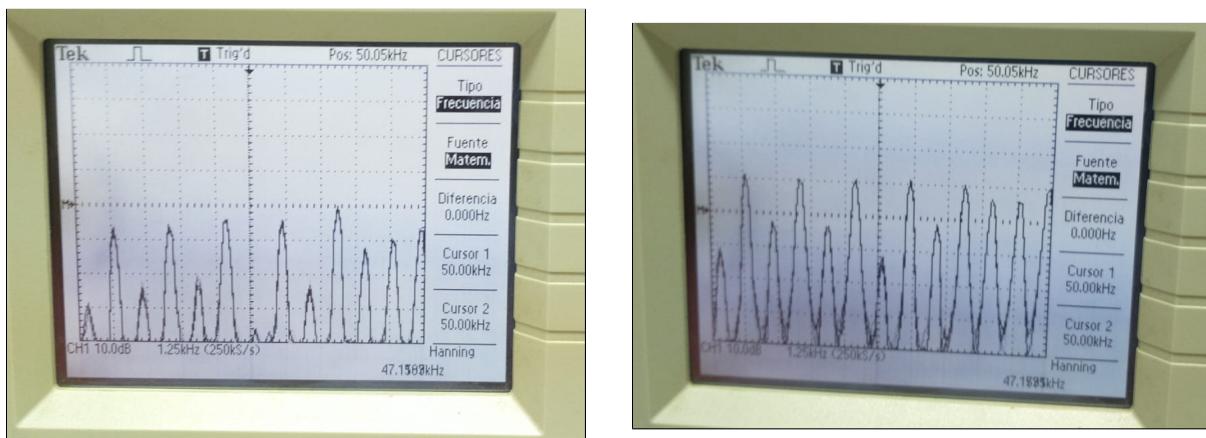
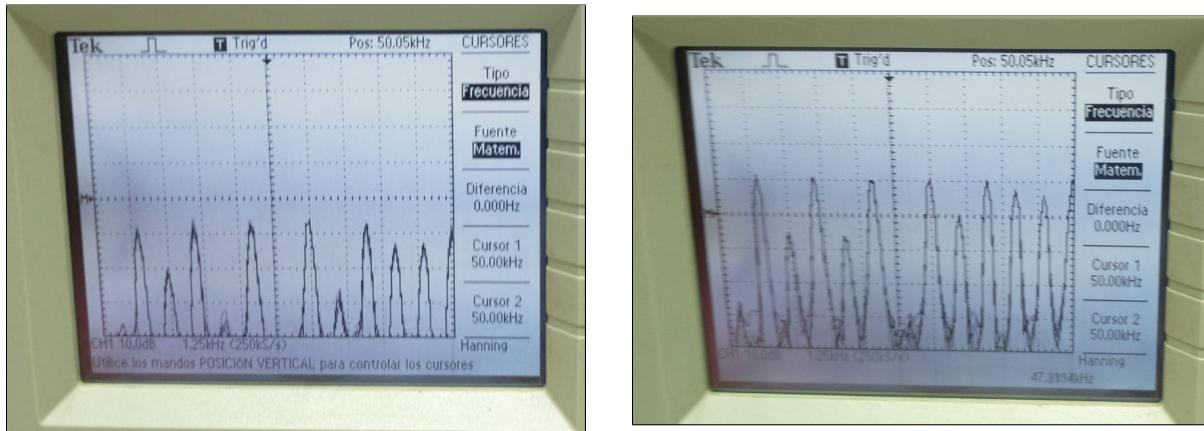


Figura 22: Generación de señal FM observada en frecuencia.

Se procede a modificar el índice de modulación, el cual responde a la siguiente ecuación:

$$m_f = \frac{\Delta f}{f_m},$$

Con lo cual, se debe variar la frecuencia de la onda modulante buscando obtener un índice de modulación de **2.4**, el cual corresponde a una modulación sin portadora. El resultado se observa en la Figura 23.



(a) Salida FM usando adquisición promedio.

(b) Salida FM usando adquisición normal.

Figura 23: Generación de señal FM observada en frecuencia.

A continuación, se disminuye ligeramente el índice de modulación y se observa el cambio en el espectro. Dicho cambio, se visualiza en la Figura 24.

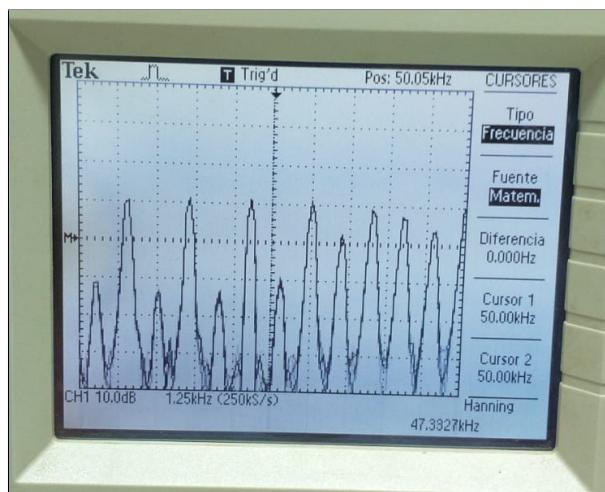
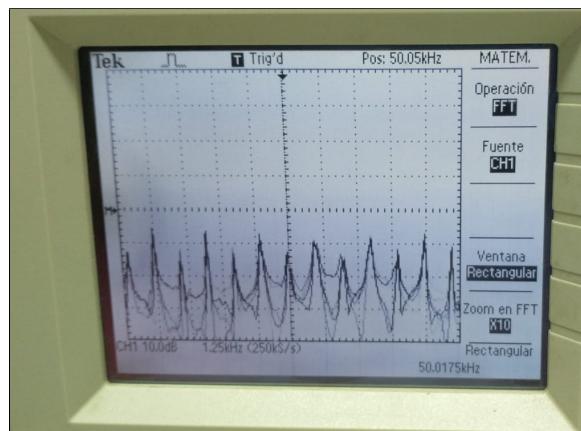


Figura 24: Índice ligeramente disminuido.

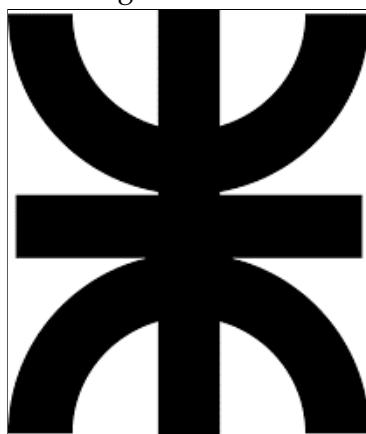
Se procede a cambiar la salida de onda modulante (control del generador G2), a onda cuadrada y triangular. Se observa el cambio en el espectro en la Figura 25 y la Figura 26 para señal cuadrada y triangular respectivamente, además se cambia el tipo de ventana entre Hanning, Rectangular y Flattop.



(a) Señal cuadrada con ventana Hanning.



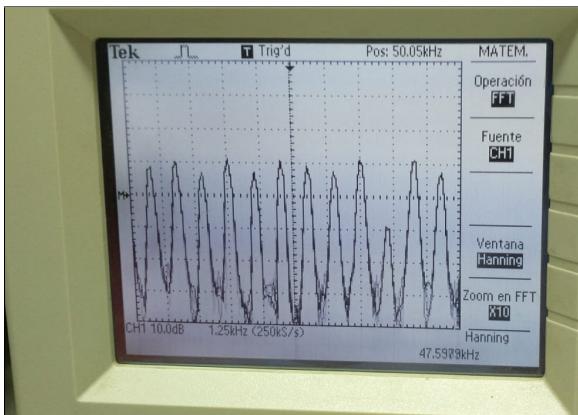
(b) Señal cuadrada con ventana Rectangular.



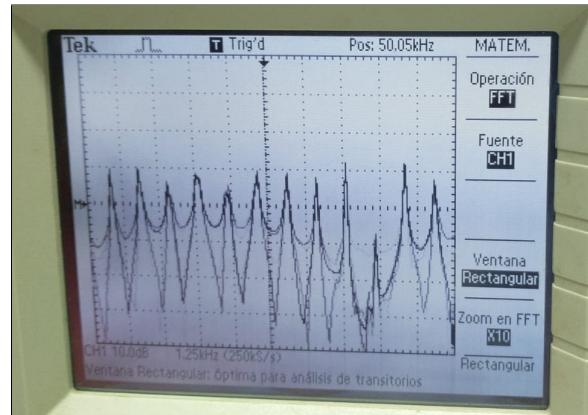
(c) Señal cuadrada con ventana Flattop.

Figura 25: Onda cuadrada como señal modulante.

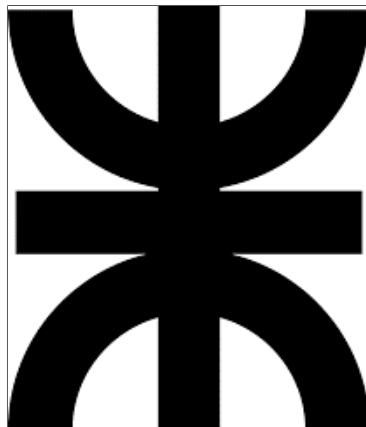
Se inyecta una señal triangular y se ven distintas ventanas.



(a) Señal triangular con ventana Hanning.



(b) Señal triangular con ventana Rectangular.

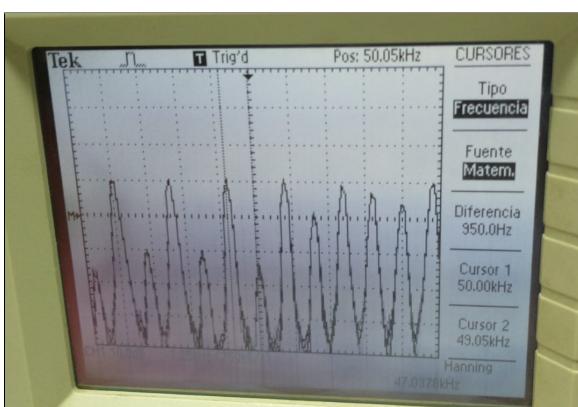


(c) Señal triangular con ventana Flattop.

Figura 26: Onda triangular como señal modulante.

Se procede a efectuar la medición de frecuencias de portadora y de bandas laterales, para determinar el valor de la frecuencia modulante. Se emplea como señal modulante una onda senoidal, y se setea ventana Hanning para realizar la medición.

$$f_{Modulante} = |f_{Portadora} - f_{BLateral}| \quad (3)$$



(a) Diferencia con banda lateral Izquierda.



(b) Diferencia con banda lateral derecha.

De la Figura 27b se observa un valor de $f_{Portadora} = 50 \text{ kHz}$ y $f_{BLateral} = 51,05 \text{ kHz}$,

reemplazando éstos valores en la ecuación (3) se tiene

$$f_{Modulante} = |50 \text{ kHz} - 51,05 \text{ kHz}| \quad \therefore \quad f_{Modulante} = 1,05 \text{ [kHz]} .$$

3.7. Análisis de la distorsión armónica producida por un amplificador

Se propone analizar un amplificador transistorizado de 4 etapas. Se ha tratado en las experiencias anteriores la **alinealidad** de éste tipo de dispositivos, para el presente experimento, nuevamente se debe tener en cuenta.

Un amplificador tiene comportamiento lineal bajo determinadas condiciones, entre ellas, para pequeña señal y trabajando a lazo cerrado. Sucede que al trabajar en lazo abierto y a máxima excursión, se ingresa en zonas no lineales de la función de transferencia, lo que modifica el comportamiento del amplificador, provocando lo que se denomina **Distorsión Armónica**.

En la experiencia se determina el porcentaje de contenido armónico, tanto para lazo abierto como para lazo cerrado, utilizando la herramienta de análisis en frecuencia del osciloscopio. El circuito a implementar se enseña en la Figura 28.

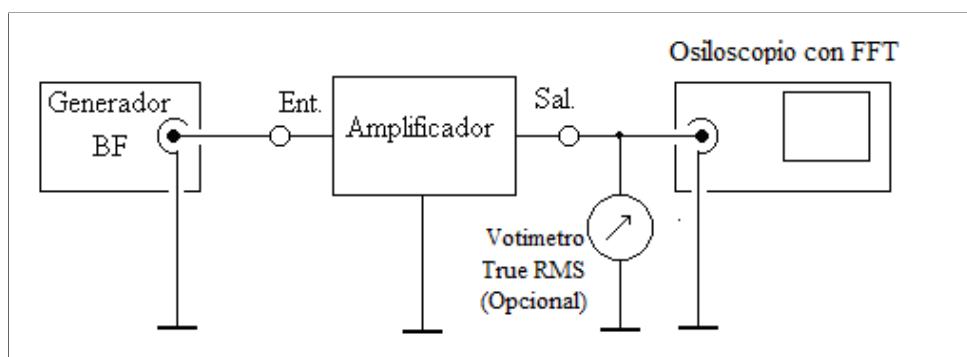
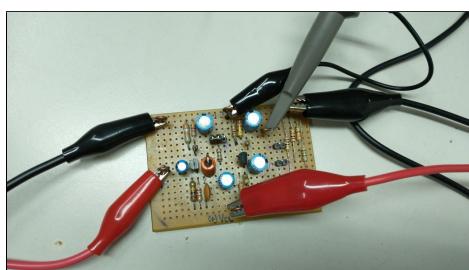
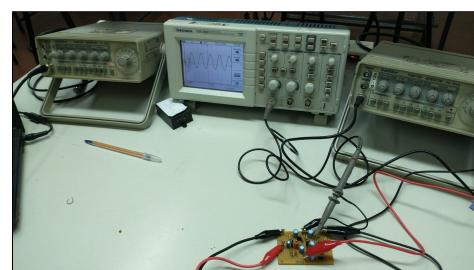


Figura 28: Esquema de circuito a implementar.

En la Figura 29 se muestran los dispositivos y el instrumental a usar.



(a) Amplificador a utilizar.



(b) Instrumental a utilizar.

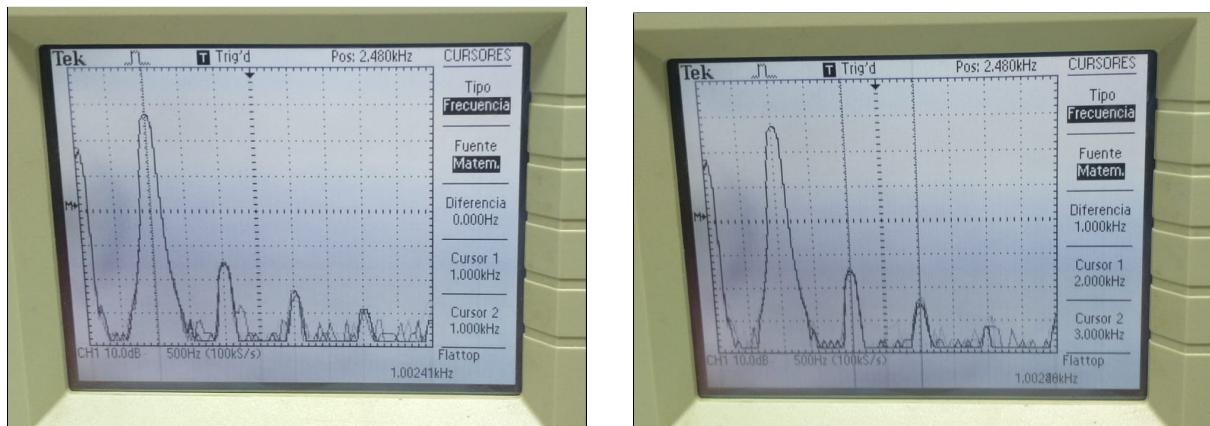
Figura 29: Amplificador a utilizar.

Inicialmente se configura el generador para **MES** (máxima excusión simétrica), y una frecuencia de 1 kHz. Para ello se procede a variar la amplitud del generador hasta el punto donde hay un recorte visible en la señal. La Figura 30 muestra dicho punto de máxima excusión.



Figura 30: Máxima excusión simétrica a lazo abierto.

Luego se muestra la fundamental y sus dos primeros armónicos.

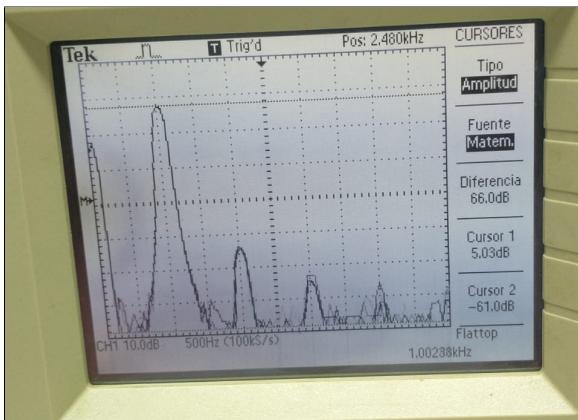


(a) Frecuencia de la fundamental $f_{fund} = 1 \text{ kHz}$.

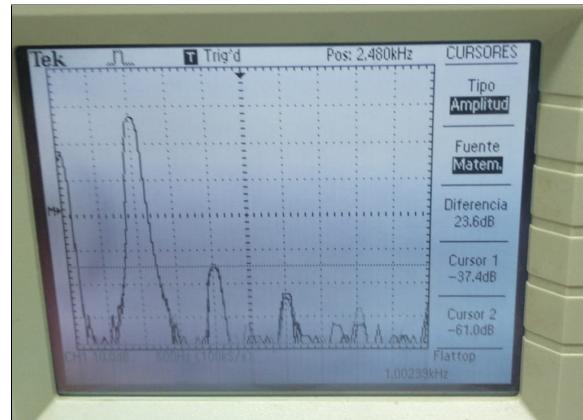
(b) Frecuencias de la segunda y tercera armónica $f_2 = 2 \text{ kHz}$ y $f_3 = 3 \text{ kHz}$.

Figura 31: Análisis espectral del amplificador con señal de 1 kHz.

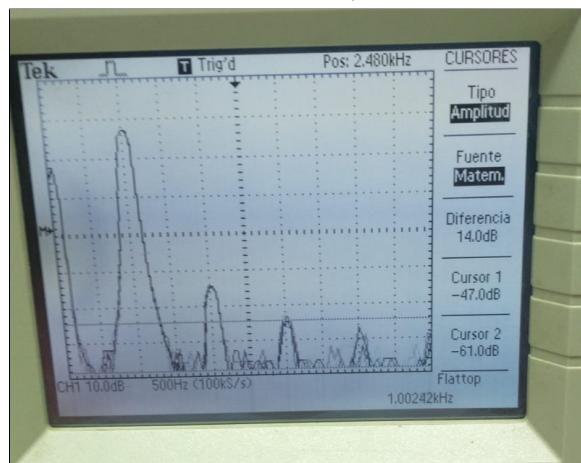
Luego se miden las amplitudes de la fundamental y armónicos.



(a) Amplitud de la fundamental $V_{fund} = 66 \text{ dBv}$.



(b) Amplitud de la segunda armónica $V_{2da} = 23,6 \text{ dBv}$.



(c) Amplitud de la tercera armónica $V_{2da} = 14 \text{ dBv}$.

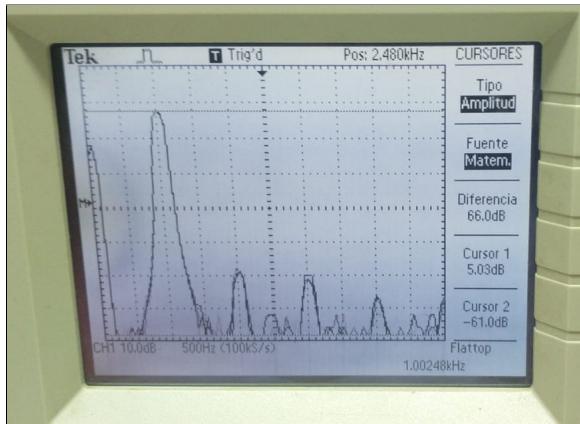
Figura 32: Amplitud de la fundamental y sus dos primeras armónicas.

Se repite el procedimiento, con la misma señal pero cerrando el lazo.

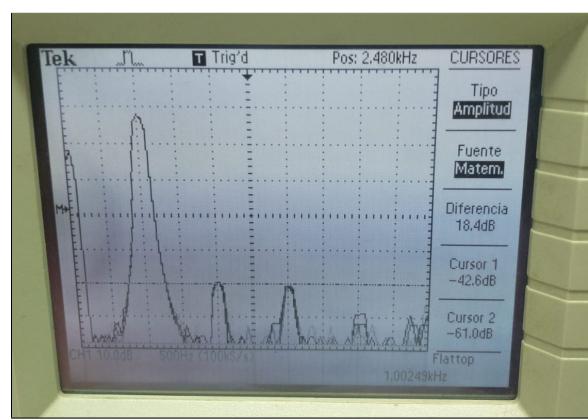


Figura 33: Frecuencia de armónicos a lazo cerrado.

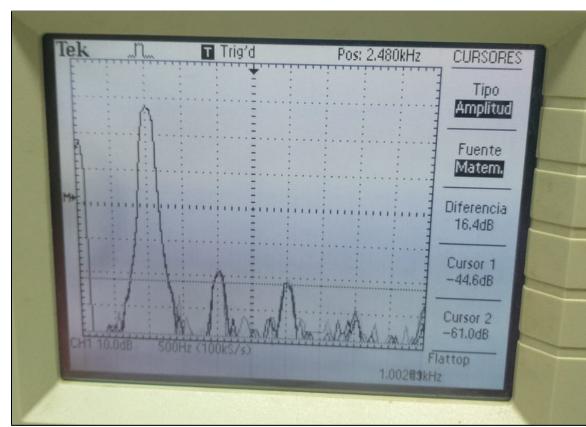
Se mide la amplitud de los mismos.



(a) Amplitud de la fundamental $V_{fund} = 66 \text{ dBv}$.



(b) Amplitud de la segunda armónica $V_{2da} = 18,4 \text{ dBv}$.



(c) Amplitud de la tercera armónica $V_{3da} = 16,4 \text{ dBv}$.

Figura 34: Amplitud de la fundamental y sus dos primeras armónicas.

4. Conclusiones

Respecto a los distintos tipos de ventanas que se encuentran disponibles para la FFT, se puede realizar las siguientes afirmaciones:

- **Hanning:** es útil para las formas de onda periódicas. Permite medir mejor la frecuencia, pero peor la amplitud que la ventana Flattop.
- **Flattop:** es útil para formas de onda periódica. Permite medir mejor la amplitud, pero peor la frecuencia que la ventana Hanning.
- **Rectangular:** es útil para pulsos o señales transitorias. Es específica para formas de onda que no presentan discontinuidades.

En el experimento 3 se forzó la aparición del aliasing. Esto se dio debido a que la velocidad de muestreo (25 kSa/s) no cumplía con el teorema del Muestreo a partir de determinada frecuencia de la señal a muestrear (a partir de 12 kHz). Esto significa, por un lado, que la señal no puede ser muestreada de forma correcta, y además, se generan componentes de frecuencia falsas que no son propias de la señal original.

Para concluir, se nombran algunas características sobre los distintos modos de adquisición que posee el osciloscopio digital:

- **Normal:** el osciloscopio muestrea la señal en intervalos de tiempo equidistantes para construir la señal. Este modo representa de forma acertada señales analógicas sin transitorios rápidos.
- **Detección de picos:** el osciloscopio detecta los valores máximo y mínimo de la señal de entrada en un intervalo de muestreo, y los utiliza para construir la señal. Con este modo se pueden detectar pulsos transitorios, que con el modo Normal podrían perderse.
- **Promedio:** el osciloscopio adquiere determinada cantidad de veces la señal, promedia esos datos y construye la señal con el resultado. Es útil para reducir el ruido.