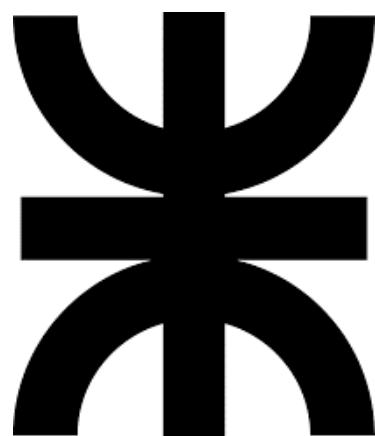


UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL CÓRDOBA

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
3.1.1. Medición de frecuencia	5
3.1.2. Medición de amplitud	5
3.2. Análisis de un tren de pulsos	6
3.3. Observación de frecuencias producto del aliasing	11
3.3.1. Aliasing con señal senoidal	11
3.3.2. Aliasing con señal cuadrada	12
3.4. Análisis de una señal modulada en amplitud	13
3.4.1. Señal senoidal como modulante	13
3.4.2. Señal cuadrada como modulante	16
3.4.3. Señal triangular como modulante	17
3.5. Observación de los productos de IMD de tercer orden	18
3.6. Análisis de una señal modulada en frecuencia	20
3.7. Análisis de la distorsión armónica producida por un amplificador	25
4. Conclusiones	30

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 $1\text{ k}\Omega$

3.1. Análisis de una forma de onda cuadrada

Se propone realizar el análisis en frecuencia de una señal de forma cuadrada, recordando que su espectro posee, de forma ideal, infinitos armónicos impares. Lo primero que se realiza es la calibración de las puntas del osciloscopio.

Luego, se conecta el generador al osciloscopio configurado con una **onda cuadrada** de frecuencia $f = 1\text{ kHz}$, y amplitud arbitraria. El menú del canal 1 se configura de la siguiente manera: **Acoplamiento CC, Sin límite de ancho de banda, Sonda x10 y No invertido**. Luego, para poder observar el espectro se configura el menú matemático como sigue: **FFT, CH1, Rectangular, y Zoom x1**. La Figura 1 muestra esta señal en tiempo y frecuencia.

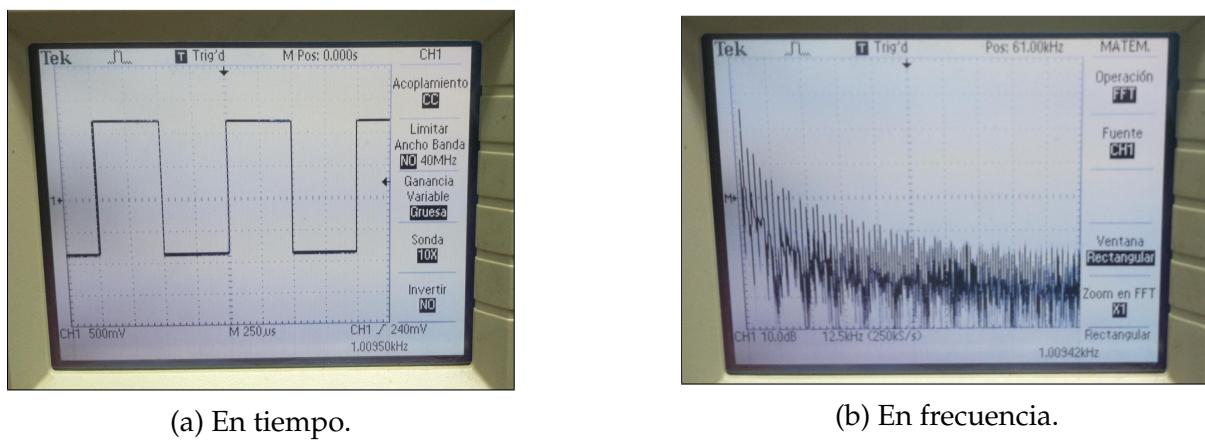


Figura 1: Señal cuadrada de 1 kHz .

A continuación, se procede a analizar los tipos de **adquisición** y **ventanas** con la misma señal previamente configurada. Para ello, se elige la opción **Zoom x10**. En la Figura 2 se muestran las distintas ventanas para el modo de adquisición **normal**.

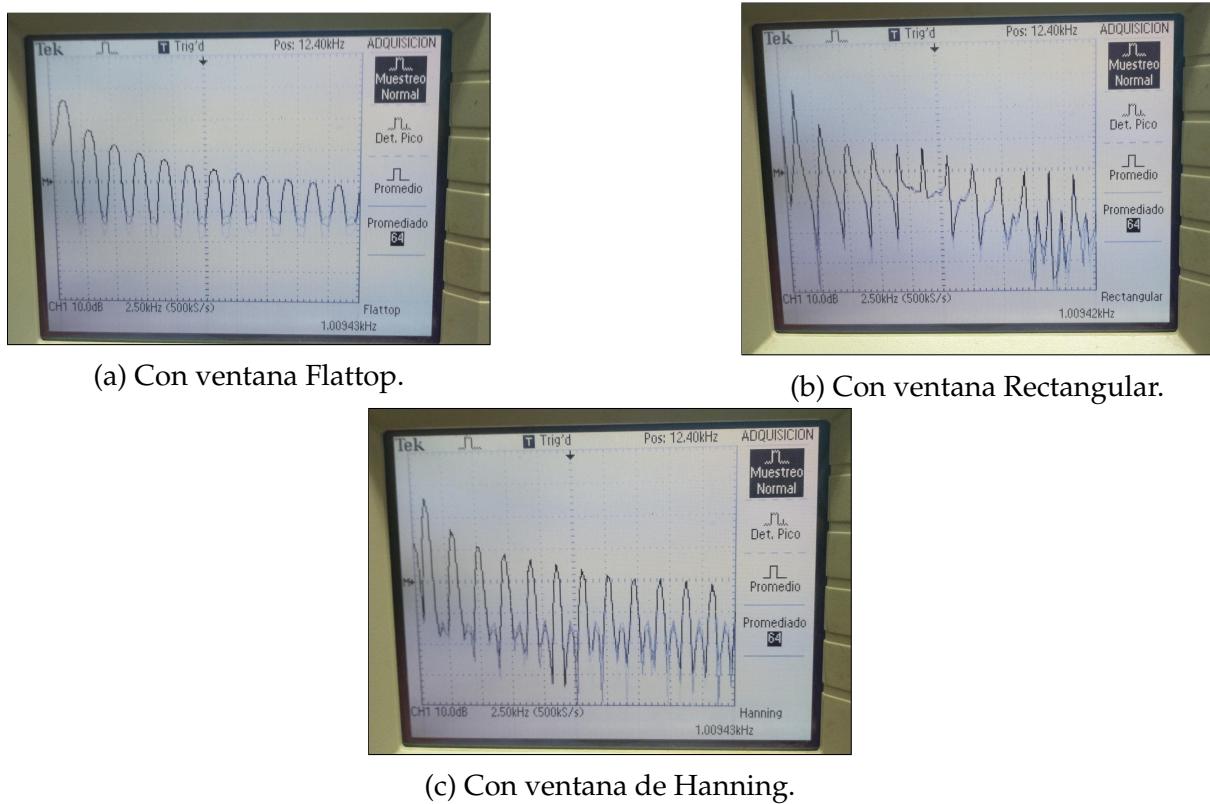


Figura 2: Señal cuadrada de 1 kHz con modo de adquisición normal..

Ahora, se selecciona el modo de adquisición de **detección de picos** y se varían los tipos de ventanas. Esto se encuentra en la Figura 3.

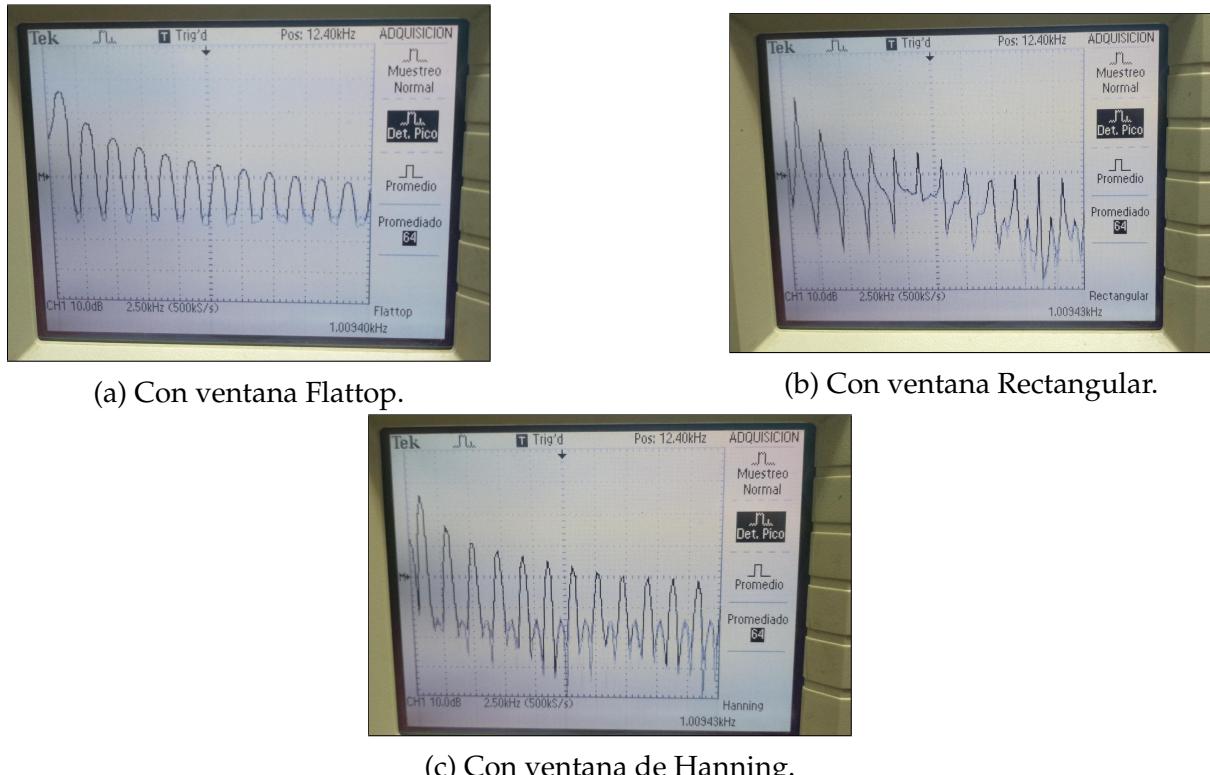
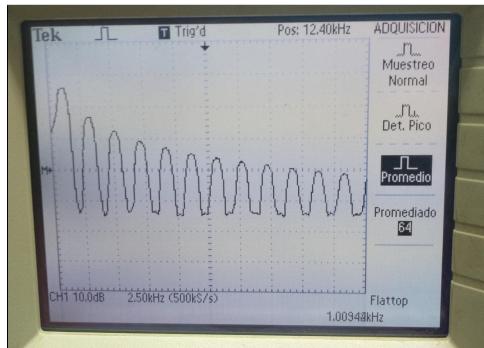
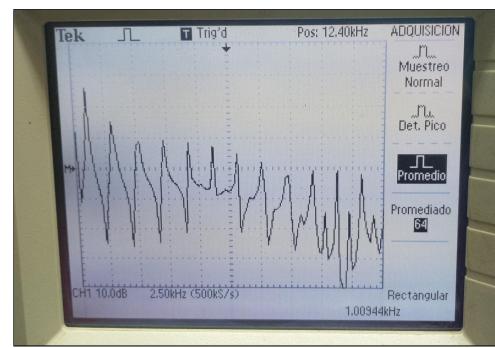


Figura 3: Señal cuadrada de 1 kHz con modo de adquisición de detección de picos.

Finalmente, se pone a prueba el modo de adquisición **promedios**, para el cual se eligen **64 cuentas**. Esto se encuentra en la Figura 4.



(a) Con ventana Flattop.



(b) Con ventana Rectangular.



(c) Con ventana de Hanning.

Figura 4: Señal cuadrada de 1 kHz con modo de adquisición de promedios.

3.1.1. Medición de frecuencia

Comp. Espectral	1	2	3	4	5	6	7
Frec. [kHz]	1,0	3,0	5,1	7,1	9,1	11,0	13,0

Tabla 1: Frecuencias de las primeras 7 componentes espectrales.

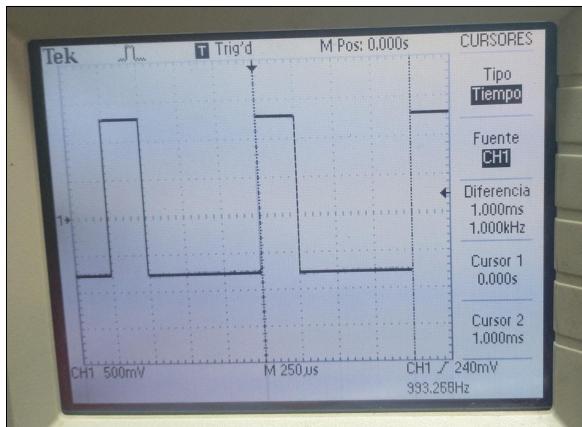
3.1.2. Medición de amplitud

Comp. Espectral	1	2	3	4	5	6	7
Tensión	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7
[dBv]	-790m	-10,2	-14,6	-17,8	-20	-21,4	-23,3
[V]	0,91	0,31	0,19	0,13	0,1	0,09	0,07
[V^2]	0,83	0,09	0,03	0,02	0,01	0,007	0,005

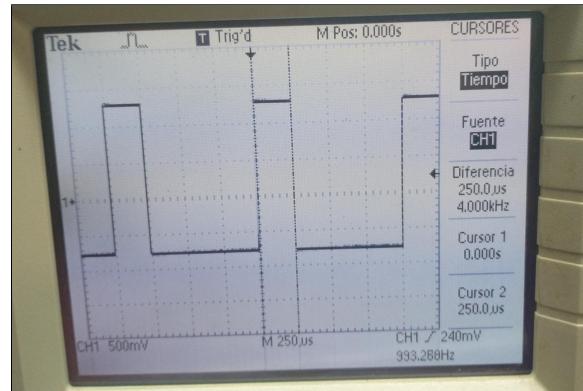
Tabla 2: Amplitudes de las primeras 7 componentes espectrales.

3.2. Análisis de un tren de pulsos

Se setea la señal de entrada.



(a) Señal pulsante de entrada, período de 1 ms.



(b) Ancho del pulso.

Figura 5: Señal pulsante de entrada.

Se observa en el espectro.

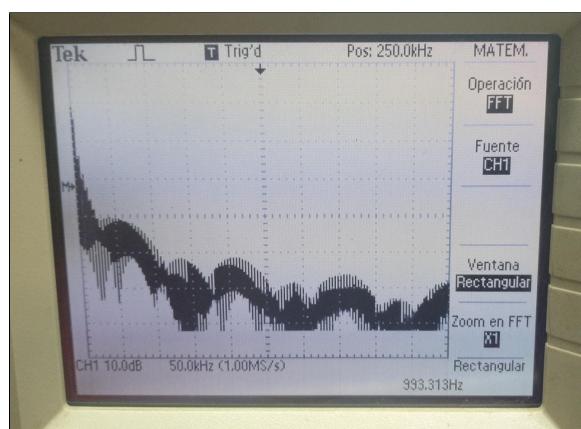
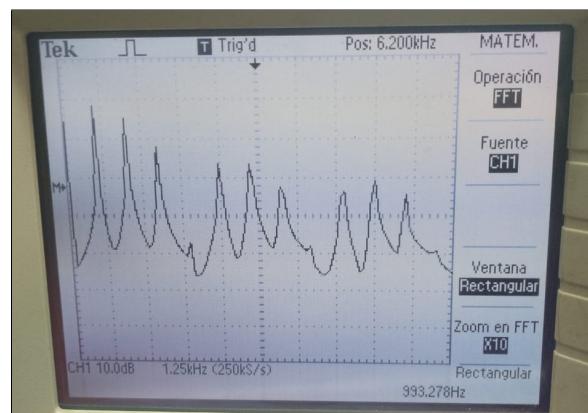


Figura 6: Análisis en frecuencia de la señal de entrada.

Luego se conmuta en los tres tipos de ventana.



(a) Análisis en frecuencia, ventana Hanning.



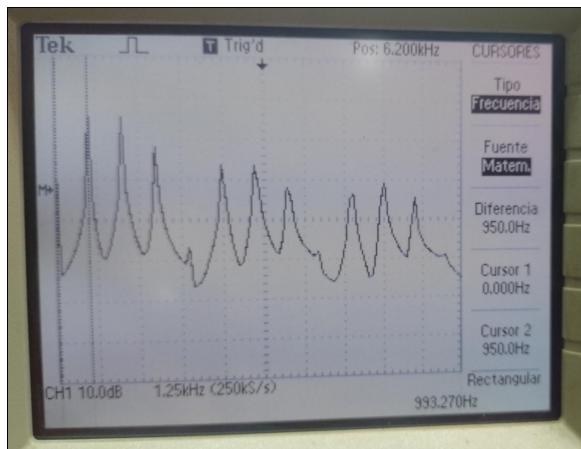
(b) Análisis en frecuencia, ventana Rectangular.



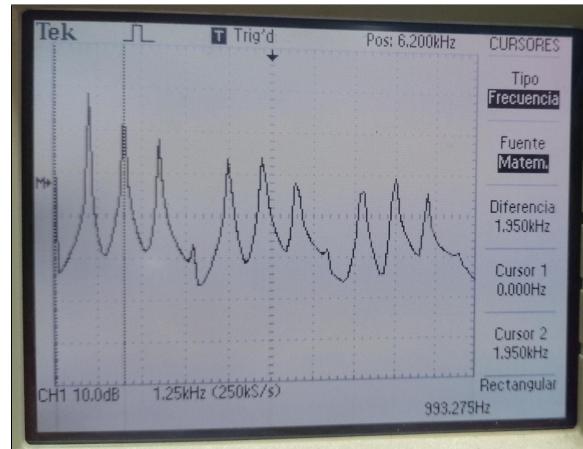
(c) Análisis en frecuencia, ventana Flattop.

Figura 7: Señal pulsante de entrada.

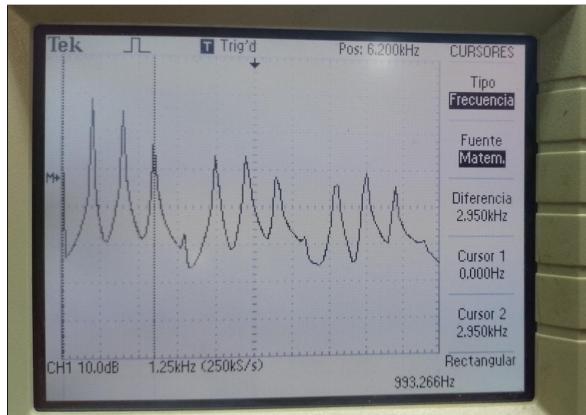
Se observan los 5 primeros armónicos en ventana Hanning.



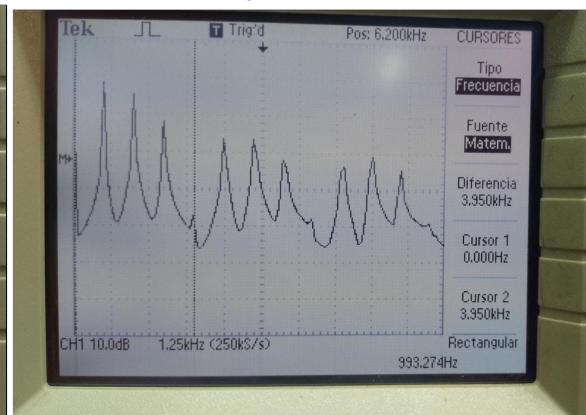
(a) Frecuencia de la fundamental en ventana Hanning, $f_1 = 950 \text{ Hz}$.



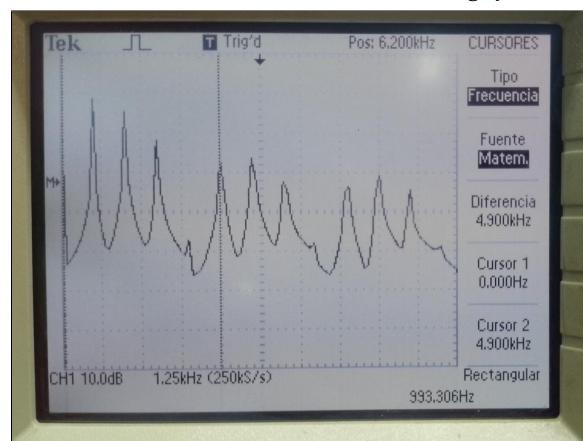
(b) Frecuencia de la segunda armónica en ventana Hanning, $f_2 = 1950 \text{ Hz}$.



(c) Frecuencia de la tercera armónica en ven- tana Hanning, $f_3 = 2950 \text{ Hz}$.



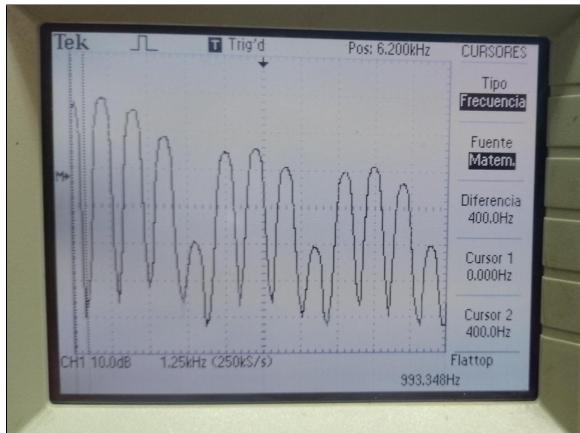
(d) Frecuencia de la cuarta armónica en ven- tana Hanning, $f_4 = 3950 \text{ Hz}$.



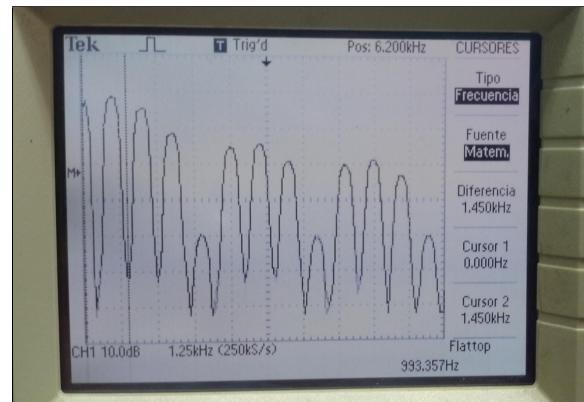
(e) Frecuencia de la quinta armónica en ven- tana Hanning, $f_5 = 4900 \text{ Hz}$.

Figura 8: Medición de frecuencia de armónicos de la señal pulsante en ventana Hanning.

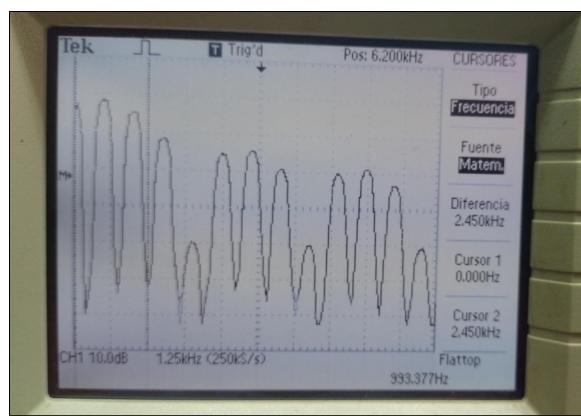
Luego se pasa a Flattop y se miden las frecuencias de los valles.



(a) Frecuencia del primer valle en ventana Flattop, $f_a = 400 \text{ Hz}$.



(b) Frecuencia del segundo valle en ventana Rectangular, $f_b = 1450 \text{ Hz}$.



(c) Frecuencia del tercer valle en ventana Flattop, $f_c = 2450 \text{ Hz}$.

Figura 9: Medición de frecuencia de valles de la señal pulsante en ventana Flattop.

Se hace una tabla para la ventana Hanning. Se coloca el cursor 1 en 0Hz y el otro marca el armónico.

Cursor 2	1erArm.	2daArm.	3raArm.	4taArm.	5taArm.
$\Delta f_n \text{ Hz}$	950	950	950	950	950

Tabla 3: Valores de frecuencia medidos en ventana Hanning.

Se calcula el promedio de las frecuencias.

$$\Delta f_{n_{\text{prom}}} = \frac{\sum \Delta f_n}{n} \quad \therefore \quad \boxed{\Delta f_{n_{\text{prom}}} = 950 \text{ [Hz]}}$$

Y el período de la onda de pulsos es.

$$\text{Periodo } (T) = \frac{1}{\Delta f_{n_{\text{prom}}}} \quad \therefore \quad \boxed{\text{Periodo } (T) = 1,053 \text{ [ms]}}$$

Se cambia a flattop y se miden los valles.

Cursor 2	1erArm.	2daArm.	3raArm.
Δf_{\min} Hz	400	1050	1000

Tabla 4: Valores de frecuencia medidos en ventan Flattop.

También se calcula promedio y período.

$$\Delta f_{n_{\text{prom}}} = \frac{\sum \Delta f_n}{n} \quad \therefore \quad \boxed{\Delta f_{n_{\text{prom}}} = 816,67 \text{ [Hz]}}$$

$$Periodo \ (T) = \frac{1}{\Delta f_{n_{\text{prom}}}} \quad \therefore \quad \boxed{Periodo \ (T) = 1,224 \text{ [ms]}}$$

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.

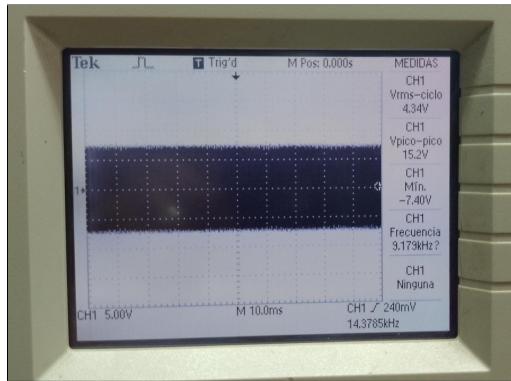
3.3.1. Aliasing con señal senoidal

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 10 se puede observar que la señal es correctamente muestreada, ya que se logra ver su componente de frecuencia.

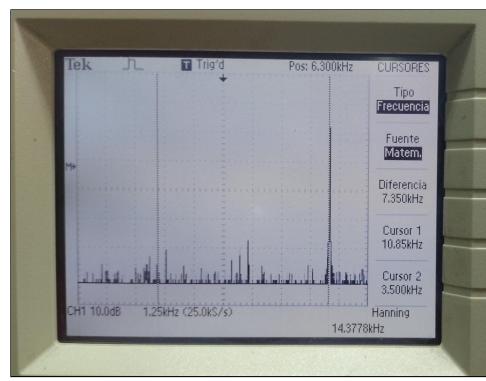


Figura 10: Muestreo de señal de 10 kHz con $f_s = 25 \text{ kSa/s}$ (sin aliasing).

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. En la Figura 11 se logra ver lo expresado para una señal de $f = 14,3 \text{ kHz}$.



(a) En tiempo.

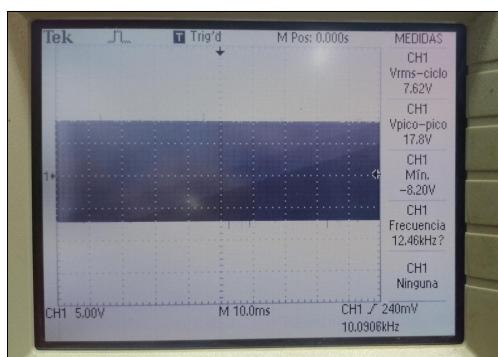


(b) En frecuencia.

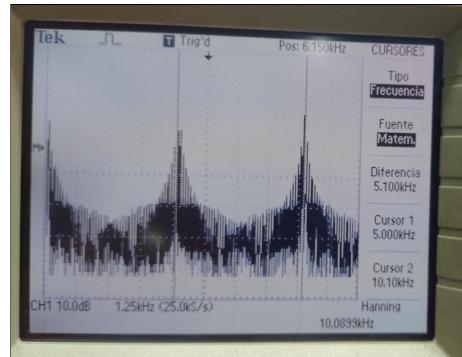
Figura 11: Muestreo de señal senoidal de 14 kHz con $f_s = 25 \text{ kSa/s}$ (con aliasing).

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 12.



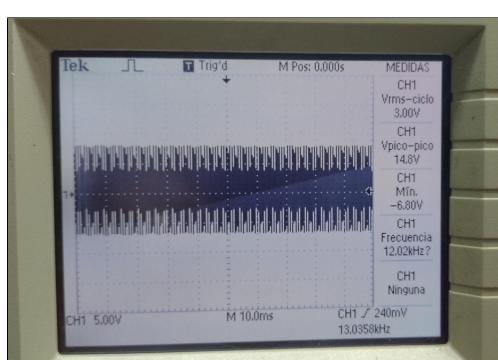
(a) $f = 10 \text{ kHz}$.



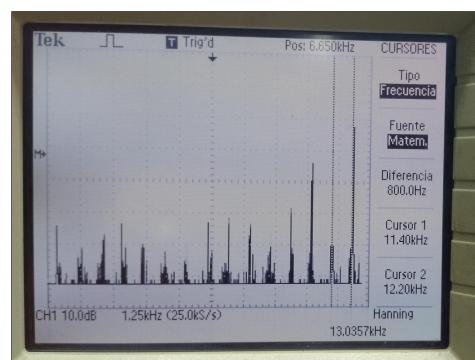
(b) En frecuencia.

Figura 12: Muestreo de una señal cuadrada de 10 kHz con $f_s = 25 \text{ kSa/s}$ (sin 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 13 se muestra lo mencionado, en donde aparecen frecuencias que no son propias de la señal cuadrada.



(a) En tiempo.



(b) En frecuencia.

Figura 13: Espectro de señal cuadrada de 13 kHz con $f_s = 25 \text{ kSa/s}$ (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 14. 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.

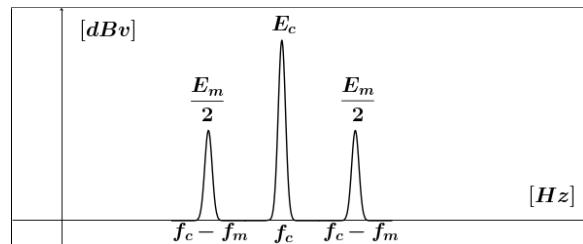


Figura 14: Ejemplo de espectro de una señal AM.

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 15. El mismo posee una circuito sintonizado o resonante, el cual está diseñado para que su frecuencia sea de $f_0 = 50 \text{ kHz}$.

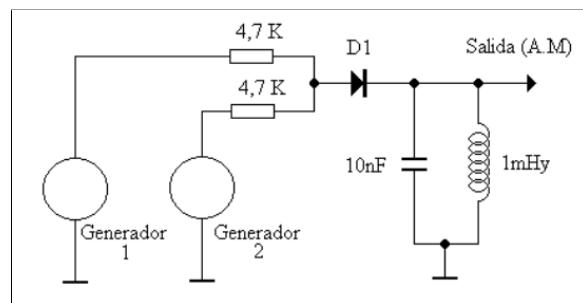
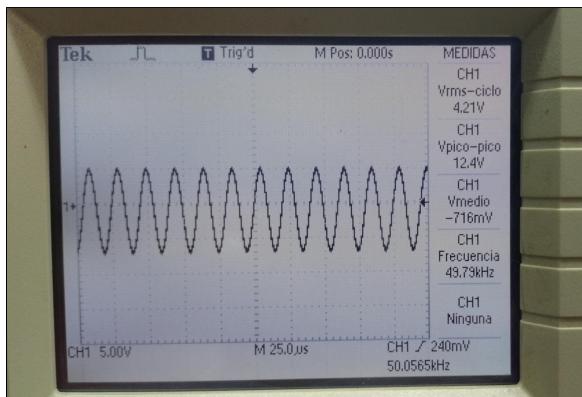


Figura 15: Circuito de modulación en amplitud.

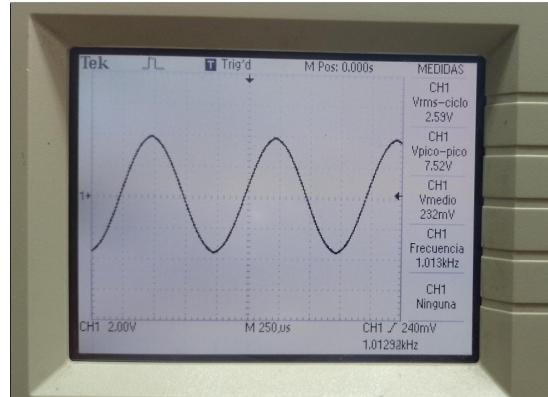
Con el generador **G1** se inyecta una señal senoidal que actúa como **portadora** de frecuencia $f_c = 50 \text{ kHz}$, y con el generador **G2** se inyecta la señal **modulante** de frecuencia $f_m = 1 \text{ kHz}$, que puede ser senoidal, triangular o cuadrada. Las amplitudes utilizadas mantienen 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 16.



(a) Portadora.



(b) Banda base senoidal.

Figura 16: 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 17.

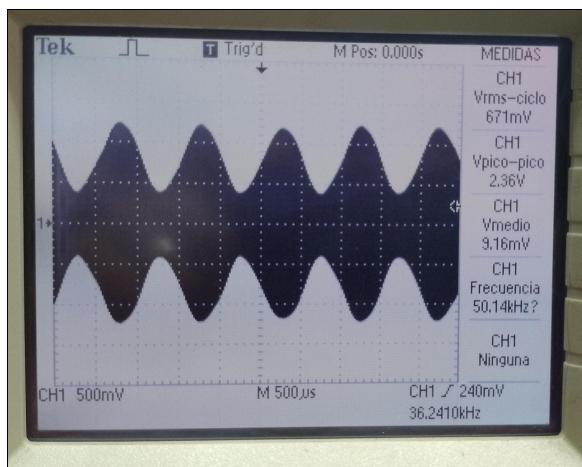
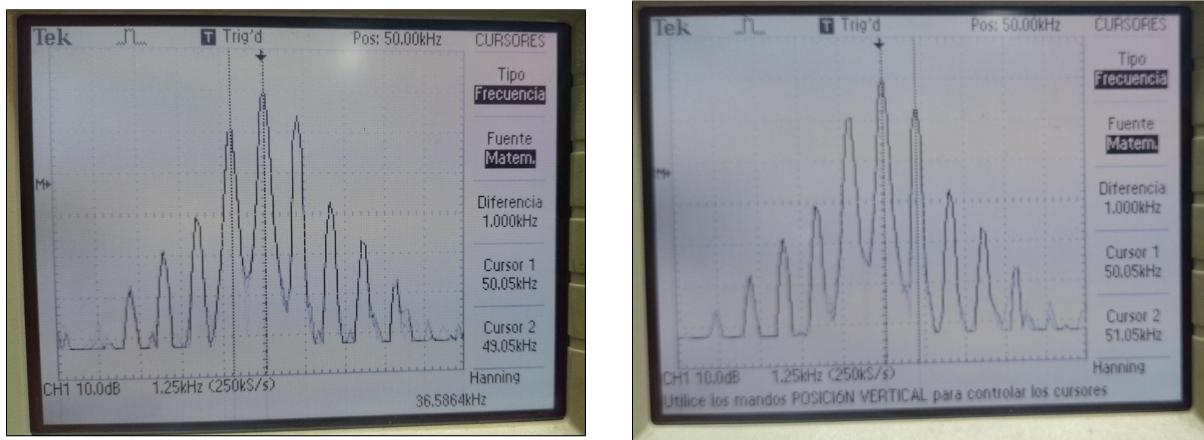


Figura 17: Señal AM con seno como modulante.

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 cursores, se procede a medir las frecuencias. Dichas mediciones se pueden apreciar en la Figura 18, y los valores se encuentran tabulados en la Tabla 5.



(a) Frecuencia BLInf.

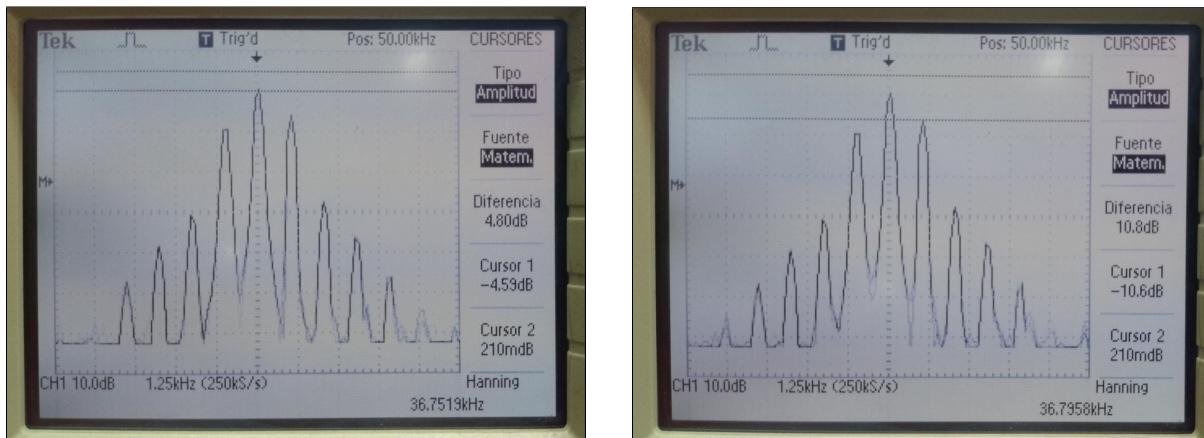
(b) Frecuencia BLSup.

Figura 18: Frecuencias de la señal AM con el seno como modulante.

f_c	f_{BLSup}	f_{BLInf}	f_m
50,05 kHz	51,05 kHz	49,05 kHz	1,00 kHz

Tabla 5: 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 19 se pueden observar dichas mediciones. Luego, con estas y el uso de las ecuaciones (1) y (2), se completa la Tabla 6.



(a) Amplitud Portadora.

(b) Amplitud BLSup.

Figura 19: Amplitudes de la señal AM con el seno como modulante.

Ampl. BLSuperior	Ampl. Portadora	Índice m	Índice m
-4,59 dBv	-10,60 dBv	-9,19 dB	0,35

Tabla 6: 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 20.

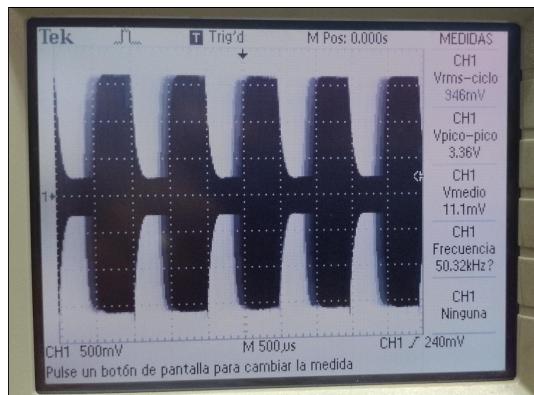
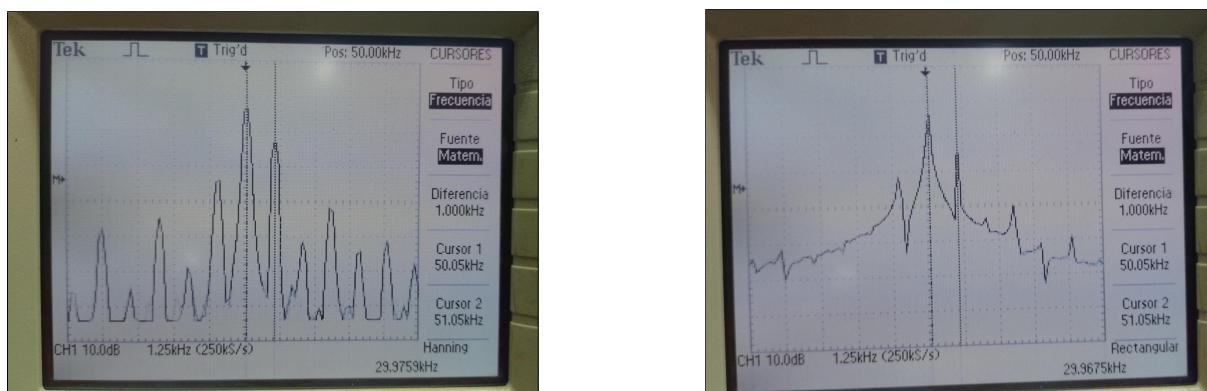


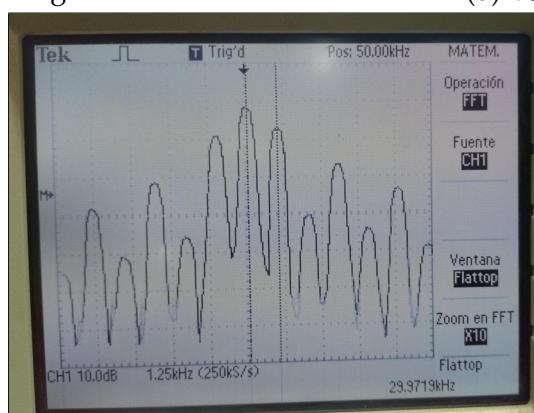
Figura 20: Señal AM con onda cuadrada como modulante.

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 21 se puede apreciar lo mencionado.



(a) Ventana Hanning.

(b) Ventana Rectangular.



(c) Ventana Flattop.

Figura 21: 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 22.

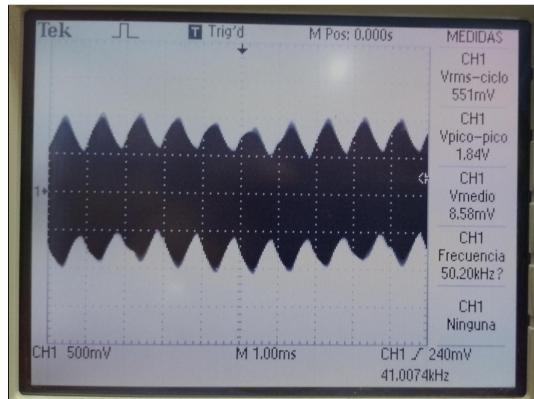
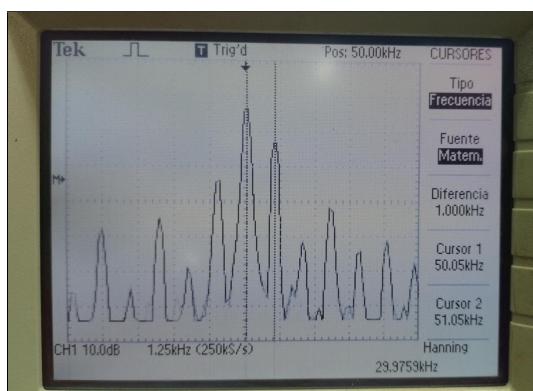
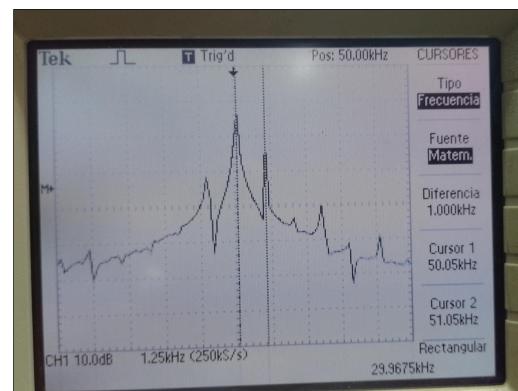


Figura 22: Señal AM con onda triangular como modulante.

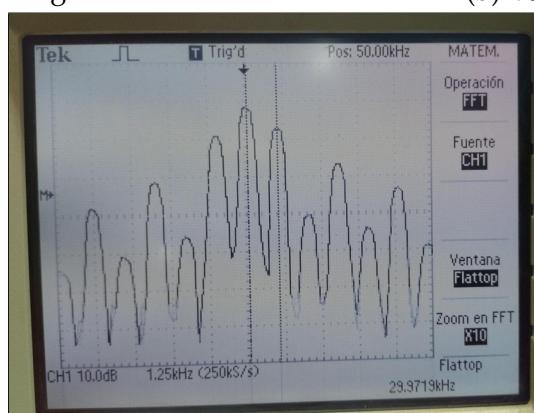
Finalmente, se hace uso de las distintas ventanas que posee el menú matemático, para ver la diferencia entre cada presentación del espectro de la señal AM en cuestión. En la Figura 23 se puede apreciar lo mencionado.



(a) Ventana Hanning.



(b) Ventana Rectangular.



(c) Ventana Flattop.

Figura 23: 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 15 de la Sección 3.4.

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

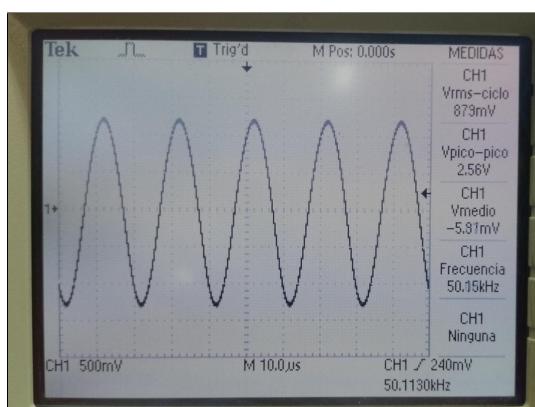
$$v_{AM} = k_a(v_{G1} + v_{G2}) + k_b(v_{G1} + v_{G2})^2 + k_c(v_{G1} + v_{G2})^3 + \dots,$$

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

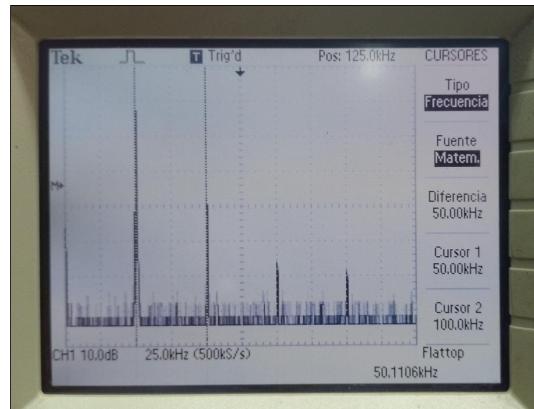
$$v_{AM} = \dots + k_b(v_{G1}^2 + 2 \cdot v_{G1}v_{G2} + v_{G2}^2) + \dots$$

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 a la vez. Los resultados se encuentran en las Figuras 24 y 25.

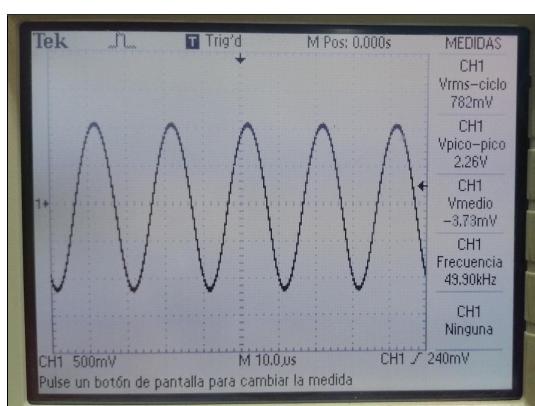


(a) En tiempo.

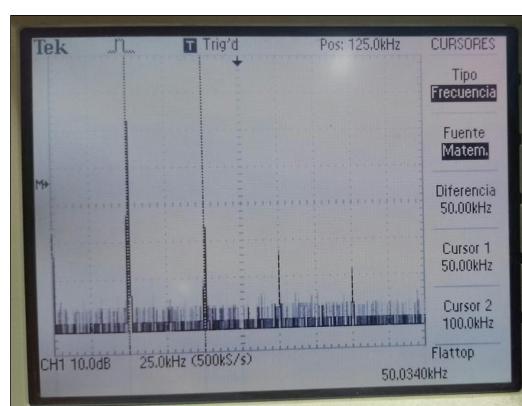


(b) En frecuencia.

Figura 24: Salida del circuito con el generador G1 encendido.



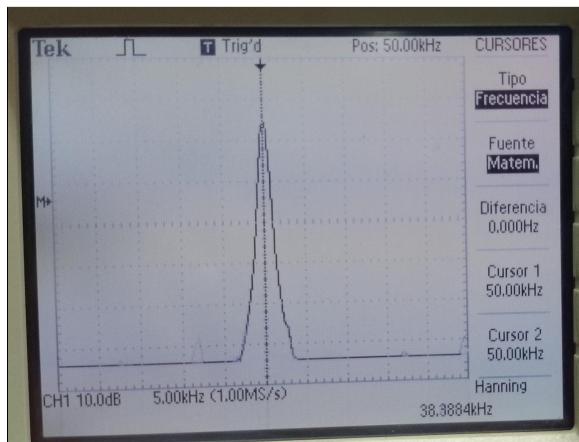
(a) En tiempo.



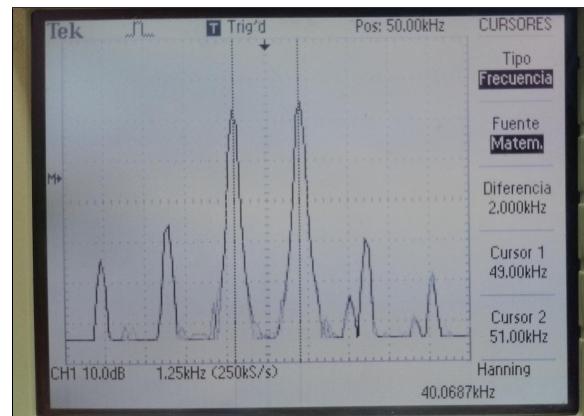
(b) En frecuencia.

Figura 25: 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 26 se puede ver lo explicado en este párrafo.



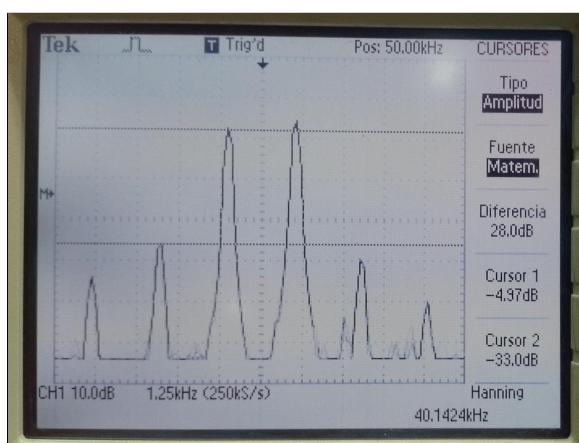
(a) Ambas a la misma frecuencia.



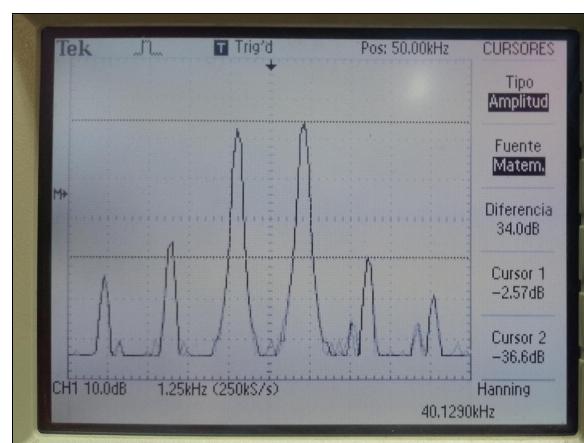
(b) Con separación de 2 kHz.

Figura 26: 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 el rechazo a los mismos, 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 27.



(a) Para $f_1 = 49 \text{ kHz}$.



(b) Para $f_2 = 51 \text{ kHz}$.

Figura 27: Medición de diferencia de amplitudes.

Los valores obtenidos de esta experiencia se encuentran tabulados en la Tabla 7.

f_1	f_2	$2f_1 - f_2$	$2f_2 - f_1$	Rechazo IMD 3º
49 kHz	51 kHz	47 kHz	53 kHz	28 dB

Tabla 7: Valores obtenidos para la medición del rechazo de IMD de 3º.

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 28.

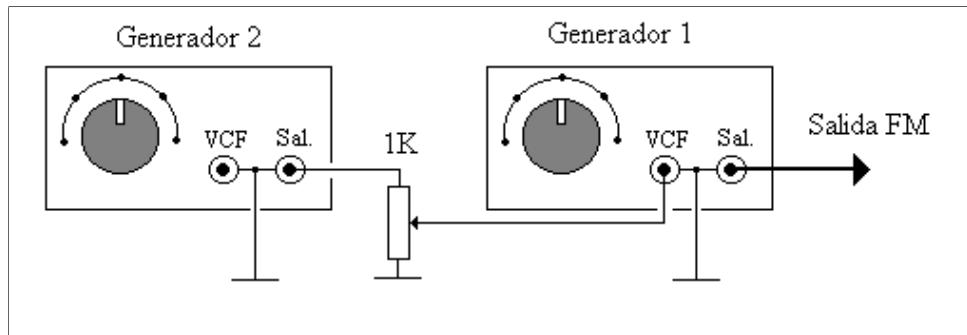
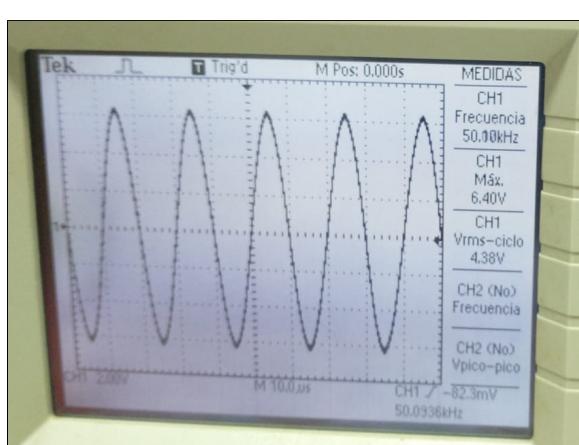
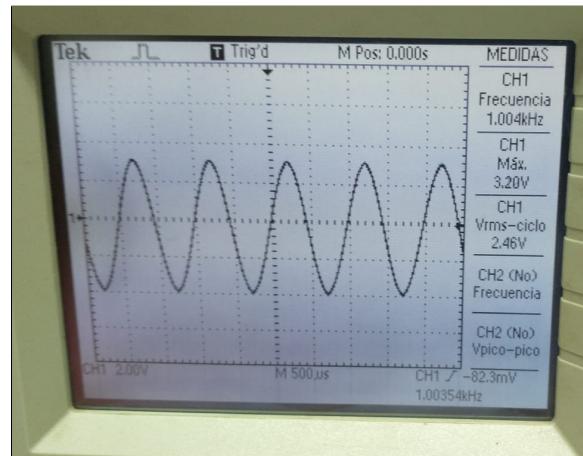


Figura 28: Conexión de los generadores.

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 29.



(a) Calibración del primer generador (G1).



(b) Calibración del segundo generador (G2).

Figura 29: 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 30.

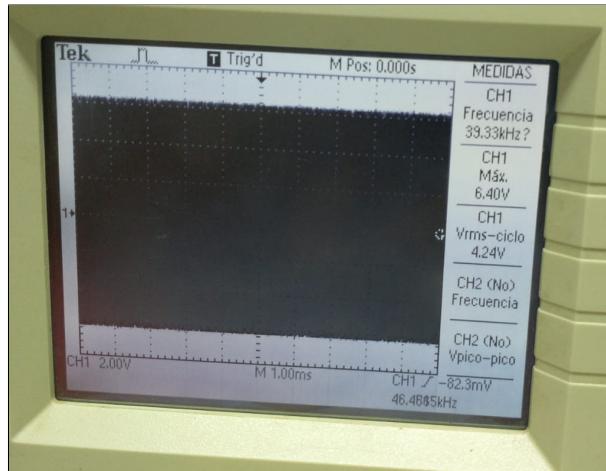
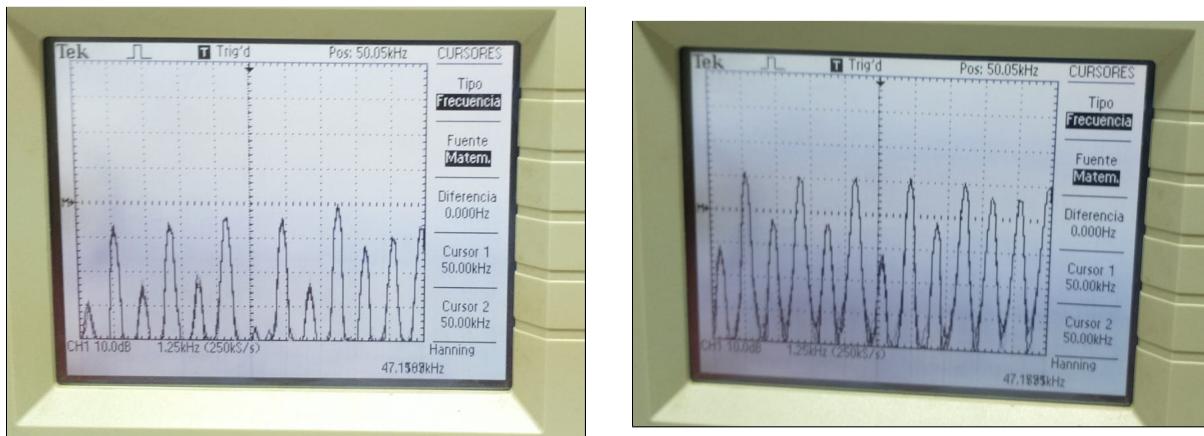


Figura 30: Señal modulada en frecuencia con base de tiempos de 1 ms.

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 31.



(a) FM con promedios.

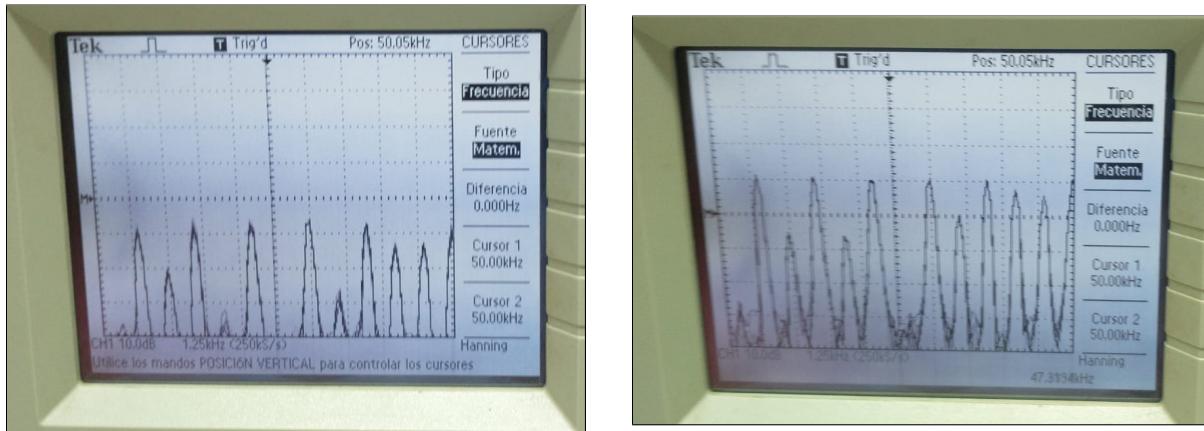
(b) Adquisicion normal.

Figura 31: 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 32.



(a) Salida FM usando adquisición promedio.

(b) Salida FM usando adquisición normal.

Figura 32: 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 33.

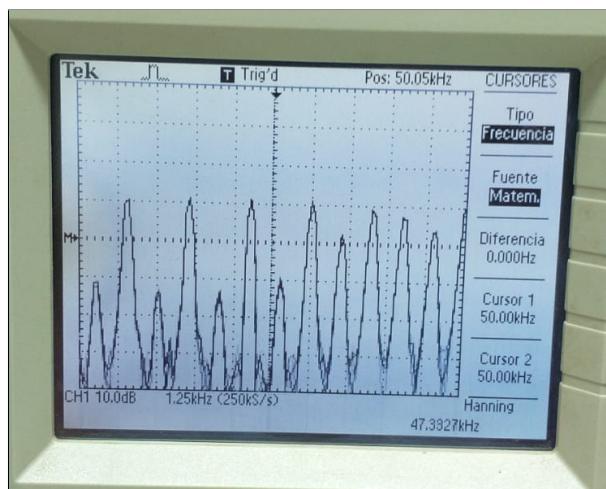
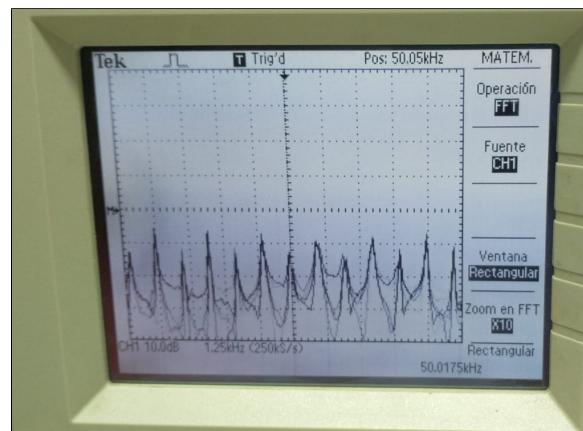


Figura 33: Índice ligeramente disminuido.

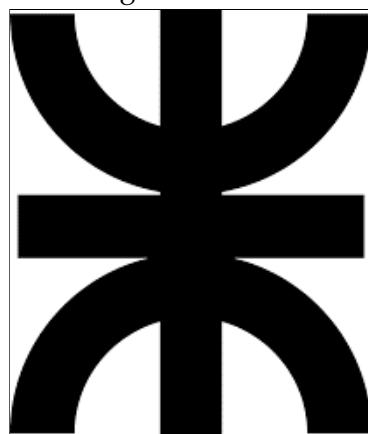
Se procede a cambiar la salida de onda modulante (control del generador G2), a onda cuadrada y triangular. Se observa el cambio en el espectro en la Figura 34 y la Figura 35 para señal cuadrada y triangular respectivamente, además se cambia el tipo de ventana entre Hanning, Rectangular y Flattop.



(a) Señal cuadrada con ventana Hanning.



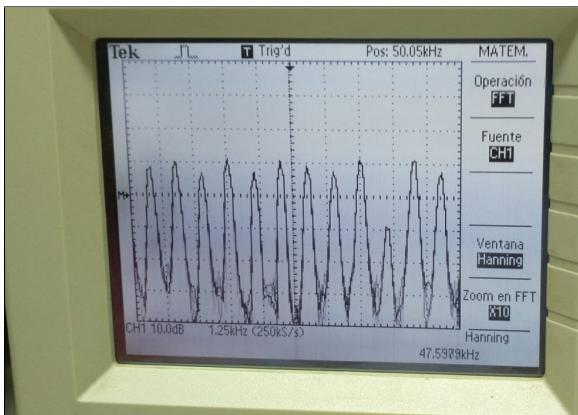
(b) Señal cuadrada con ventana Rectangular.



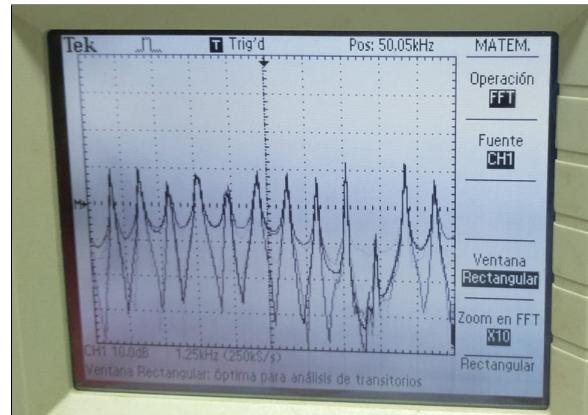
(c) Señal cuadrada con ventana Flattop.

Figura 34: Onda cuadrada como señal modulante.

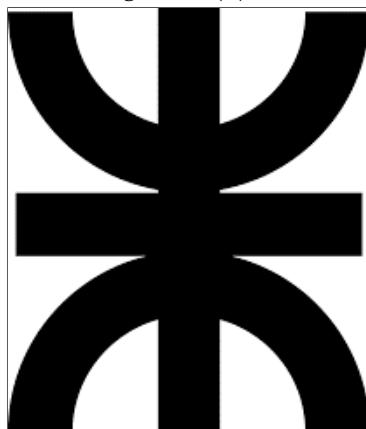
Se inyecta una señal triangular y se ven distintas ventanas.



(a) Señal triangular con ventana Hanning.



(b) Señal triangular con ventana Rectangular.

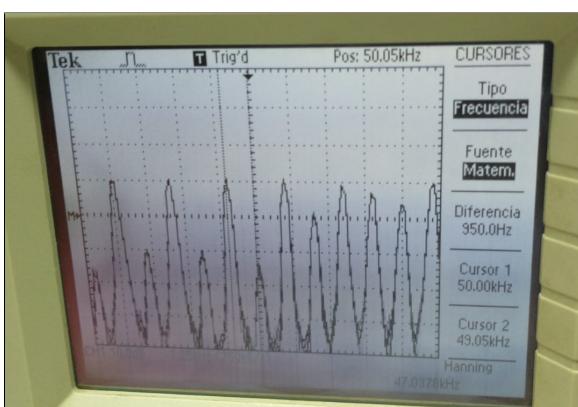


(c) Señal triangular con ventana Flattop.

Figura 35: 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 inferior.



(b) Diferencia con banda lateral superior.

De la Figura 36b 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 37.

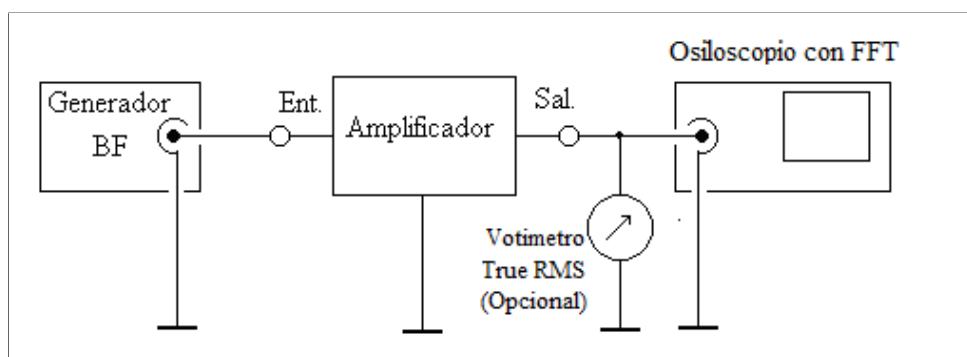
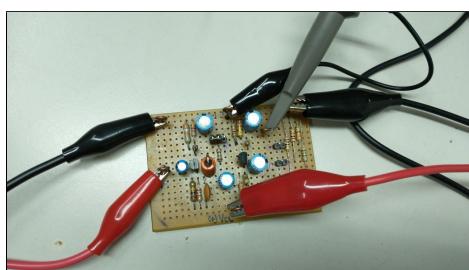
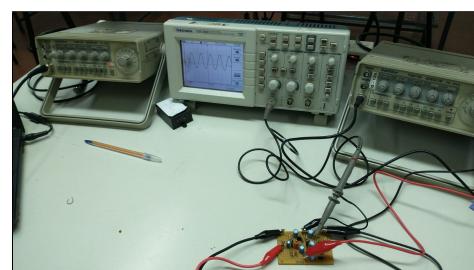


Figura 37: Esquema del circuito a implementar.

En la Figura 38 se muestran los dispositivos y el instrumental a usar.



(a) Amplificador a utilizar.



(b) Instrumental a utilizar.

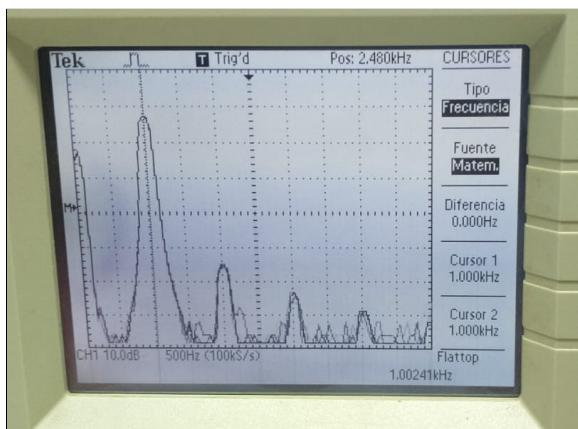
Figura 38: Amplificador a utilizar.

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 39 muestra dicho punto de máxima excusión.

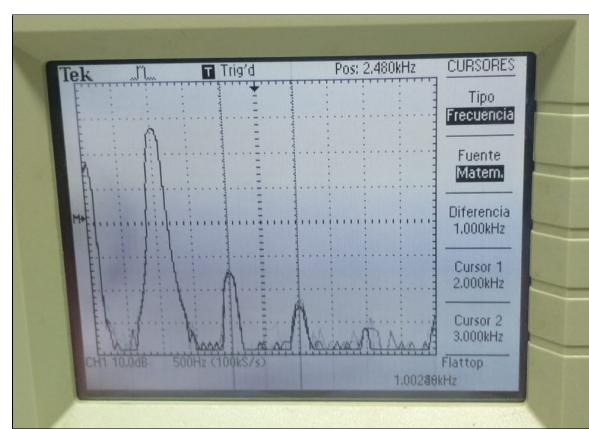


Figura 39: Máxima excusión simétrica a lazo abierto.

Luego, se procede a hacer un análisis de frecuencia, para ello se configura el osciloscopio nuevamente en modo **FFT**, **Flattop**, **Zoom X10**, y **100 kS/s**. En éste punto, se procede a realizar la medición de la frecuencia de la fundamental y sus dos primeros armónicos, lo cual se observa en la Figura 40.



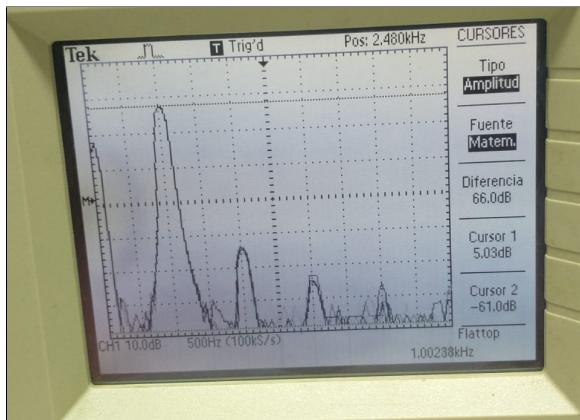
(a) Frecuencia de la fundamental $f_{fund} = 1 \text{ kHz}$.



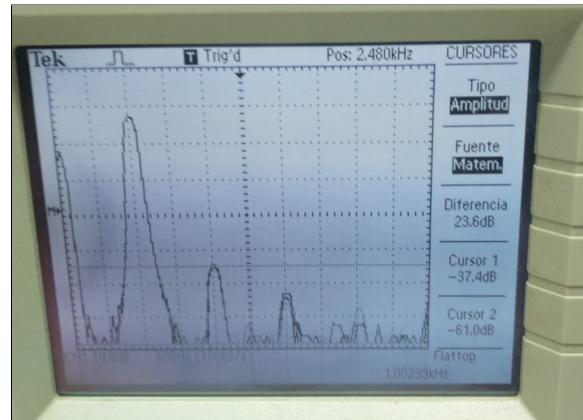
(b) Frecuencias de la segunda y tercera armónica $f_2 = 2 \text{ kHz}$ y $f_3 = 3 \text{ kHz}$.

Figura 40: Análisis espectral del amplificador con señal de 1 kHz a lazo abierto.

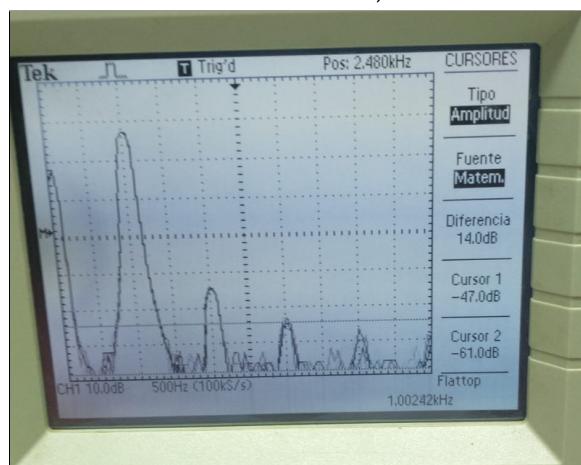
En la Figura 41, se miden las amplitudes de la fundamental y sus dos primeros armónicos.



(a) Amplitud de la fundamental $V_{fund} = 5.03 \text{ dBv}$.



(b) Amplitud de la segunda armónica $V_{2da} = -37.4 \text{ dBv}$.



(c) Amplitud de la tercera armónica $V_{3da} = -47 \text{ dBv}$.

Figura 41: Amplitud de la fundamental y sus dos primeras armónicas a lazo abierto.

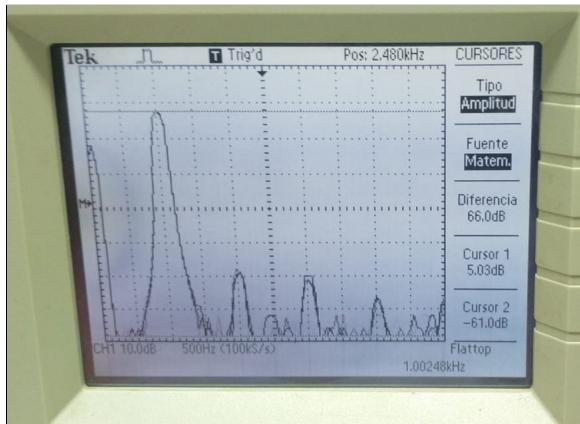
Ahora, se procede a hacer el mismo análisis a lazo cerrado. Para empezar se ubican las frecuencias de la fundamental y sus dos primeros armónicos, ésto se enseña en la Figura 42.



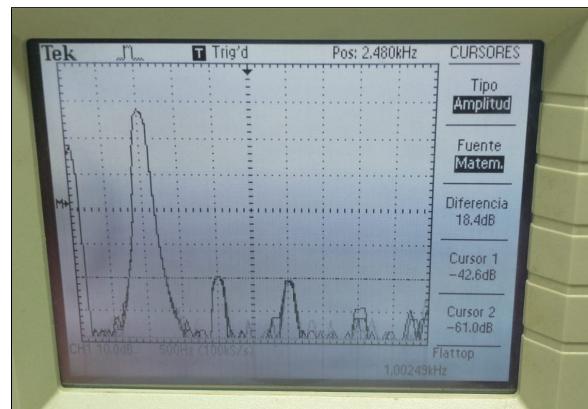
Figura 42: Frecuencia de armónicos a lazo cerrado.

Por consiguiente, se miden las amplitudes de los ya mencionados, como muestra

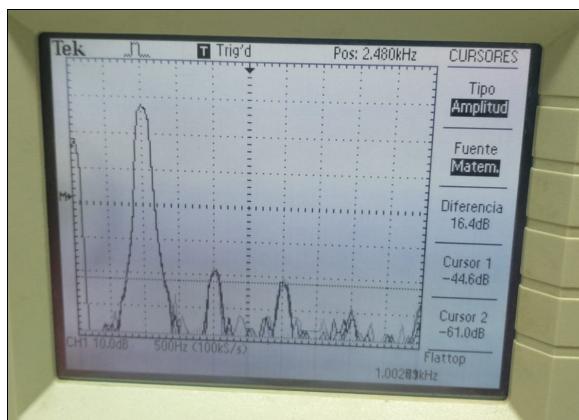
la Figura 43. Para ello se coloca un cursor en el punto a medir, y éste valor es correspondiente a la amplitud en dB referenciada a 1 [V_{rms}].



(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 $V_{3ra} = 16,4 \text{ dBv}$.

Figura 43: Amplitud de la fundamental y sus dos primeras armónicas a lazo cerrado.

Finalmente se confecciona una tabla de valores con los resultados obtenidos para lazo abierto y lazo cerrado, y se calcula la **Distorsión armónica** en porcentaje, que se define como

$$Distorsion\ Armonica \% = \frac{V_{arm}}{V_1} \cdot 100 , \quad (4)$$

con $V_{arm} = \sqrt{V_{2da}^2 + V_{3ra}^2}$.

Lo anteriormente dicho se muestra en la Tabla 8 y la Tabla 9.

Magnitud	$V_{salida(PAP)}$	1erArmonica	2daArmonica	3raArmonica
Frecuencia [kHz]	1	1	2	3
dBv	—	5,03	-37,4	-47
Tensión [V]	4,88	1,784	0,0135	0,00447

Tabla 8: Valores obtenidos a Lazo Abierto.

Magnitud	V _{salida(PAP)}	1erArmonica	2daArmonica	3raArmonica
Frecuencia [kHz]	1	1	2	3
dBv	—	5,03	-42,6	-44,6
Tensión [V]	4,88	1,784	0,00741	0,00588

Tabla 9: Valores obtenidos a Lazo Cerrado.

Finalmente, se determina la distorsión armónica total a lazo abierto y lazo cerrado.
A lazo abierto se tiene que

$$V_{arm_{LazoAbierto}} = \sqrt{(13,5 \text{ mV})^2 + (4,47 \text{ mV})^2} \implies V_{arm} = 14,22 \text{ [mV]},$$

y haciendo uso de la ecuación 4 dicho valor será

$$Distorsion\ Armonica_{arm_{LazoAbierto}} = \frac{14,22 \text{ mV}}{1,784 \text{ V}} \cdot 100 \quad \therefore \quad Distorsion_{LA} = 0,8\%.$$

Luego se repiten los cálculos para lazo cerrado, obteniéndose

$$V_{arm_{LazoCerrado}} = \sqrt{(7,41 \text{ mV})^2 + (5,88 \text{ mV})^2} \implies V_{arm} = 9,46 \text{ [mV]},$$

y con éste valor se determina la distorsión armónica total, que será

$$Distorsion\ Armonica_{arm_{LazoCerrado}} = \frac{9,46 \text{ mV}}{1,784 \text{ V}} \cdot 100 \quad \therefore \quad Distorsion_{LC} = 0,53\%.$$

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.