

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
2.0.1. Analizador de Fourier	2
2.0.2. Módulo matemático en Osciloscopios Digitales	3
3. Actividad Práctica	7
3.1. Análisis de una forma de onda cuadrada	7
3.1.1. Medición de frecuencia	9
3.1.2. Medición de amplitud	10
3.2. Análisis de un tren de pulsos	12
3.3. Observación de frecuencias producto del aliasing	17
3.3.1. Aliasing con señal senoidal	17
3.3.2. Aliasing con señal cuadrada	18
3.4. Análisis de una señal modulada en amplitud	19
3.4.1. Señal senoidal como modulante	19
3.4.2. Señal cuadrada como modulante	22
3.4.3. Señal triangular como modulante	23
3.5. Observación de los productos de IMD de tercer orden	24
3.6. Análisis de una señal modulada en frecuencia	26
3.7. Análisis de la distorsión armónica producida por un amplificador	31
4. Conclusiones	36

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

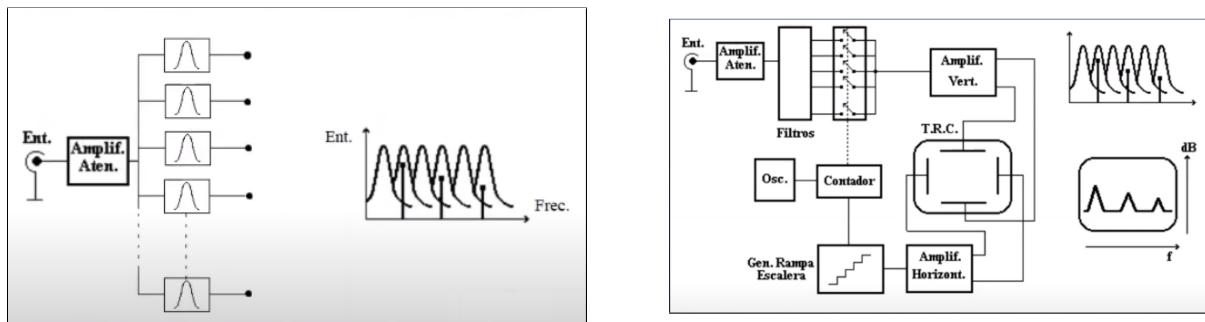
Realizar análisis de señales en dominio de la frecuencia, posee la ventaja de poder brindar mas información a diferencia de hacerlo bajo el dominio del tiempo. Por ejemplo, se puede visualizar una onda senoidal en el tiempo, entregada por un generador de funciones, con un osciloscopio y notar una distorsión muy leve en sus picos, casi imperceptible, lo cual, si dicha señal se la analizara bajo el dominio de la frecuencia, quedaría en evidencia clara que la misma no es una señal senoidal pura sino que posee armónicos debido al modo que utilizan los generadores de funciones para crear dicha señal.

La desventaja de analizar señales en el dominio de la frecuencia es que no se puede obtener información de la fase relativa de la señal bajo análisis, solo es posible obtener la amplitud de las componentes espectrales. La otra desventaja a destacar es que, resulta difícil realizar análisis de transitorios rápidos, estos mismos son mas cómodos de analizar en el dominio del tiempo.

Para el presente trabajo práctico se realizan los ensayos con un osciloscopio digital, el cual posee un modulo matemático que cuenta con la transformada rápida de Fourier (FFT).

2.0.1. Analizador de Fourier

El analizador de Fourier, posee un conjunto de filtros donde cada uno de los mismos se encuentran ligeramente desfasados entre si y repartidos de manera uniforme sobre el margen de frecuencia que se desea analizar, tal como se observa en la Figura 1a. El conjunto de filtros puede formar parte de un sistema más complejo, donde sus salidas pueden ser multiplexadas y mostradas en conjunto con un amplificador vertical en una pantalla y a su vez, el multiplexor con un contador, aparte de seleccionar el conjunto de filtros, generar una señal de rampa escalera para posteriormente pasar por un amplificador horizontal y realizar un barrido de eje horizontal de la pantalla para poder visualizar el espectro en frecuencia de una señal. En la Figura 1b, se muestra un diagrama en bloques simplificado de un analizador de Fourier el cual, su principal ventaja es que, el análisis se hace prácticamente en forma simultánea en todo el espectro. Pero dichos instrumentos poseen como desventaja una excesiva complejidad del sistema y a su vez poseen baja resolución con un *span* (margen de frecuencia de trabajo) fijo.



(a) Conjunto de filtros.

(b) Esquema en bloques simplificador.

Figura 1: Analizador de Fourier básico.

2.0.2. Módulo matemático en Osciloscopios Digitales

Con la llegada de los osciloscopios digitales con módulo matemático, estos mismos fueron reemplazando los analizadores de Fourier convencionales. Dicho módulo posee un algoritmo de Transformada Rápida de Fourier (FFT), donde a partir de las muestras tomadas en el dominio del tiempo de una señal de entrada, se realiza la conversión de la señal con la FFT al dominio de la frecuencia. El esquema en bloques simplificado se puede observar en la Figura 2.

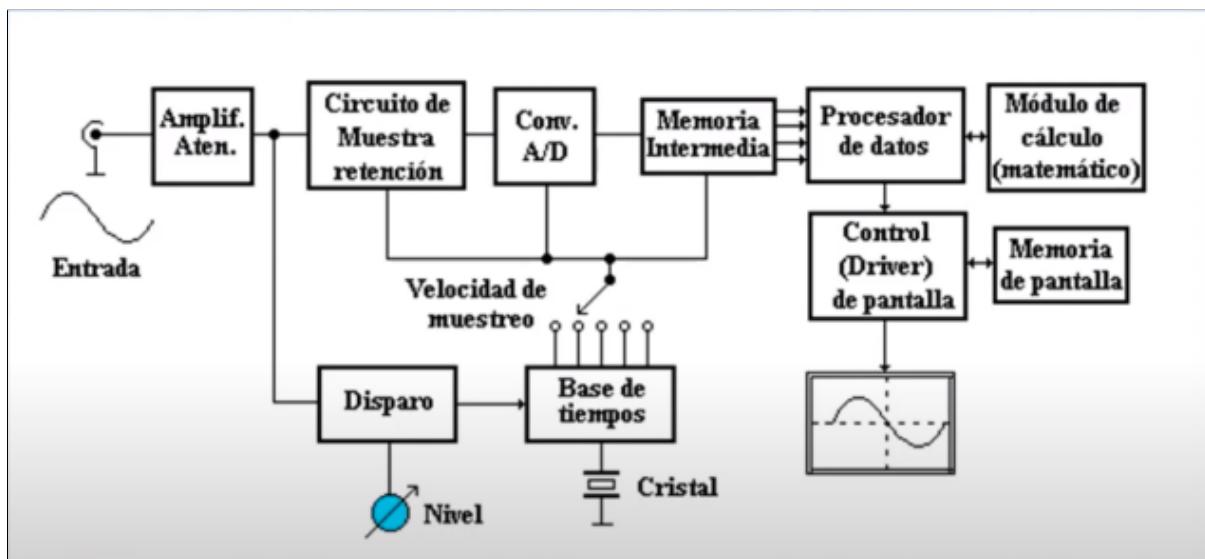


Figura 2: Módulo matemático en Osciloscopio Digital.

En el modelo de Osciloscopio utilizado en el presente trabajo práctico (TP) es el (*Tektronix TDS 1001*), cuya presentación de pantalla en modo FFT se observa en la Figura 3.

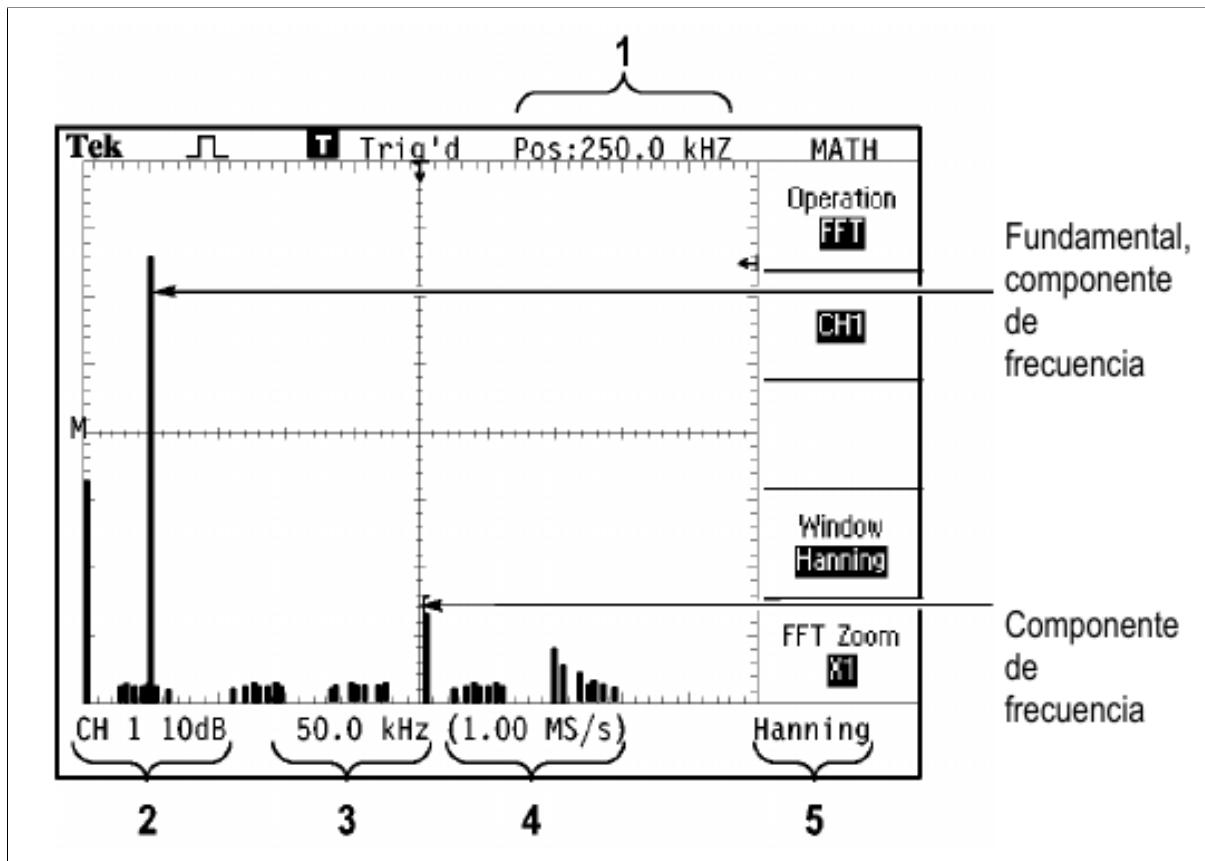
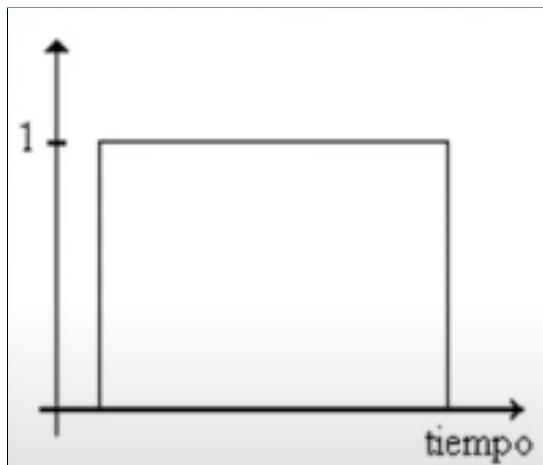


Figura 3: Modo Matemático en Osciloscopio,

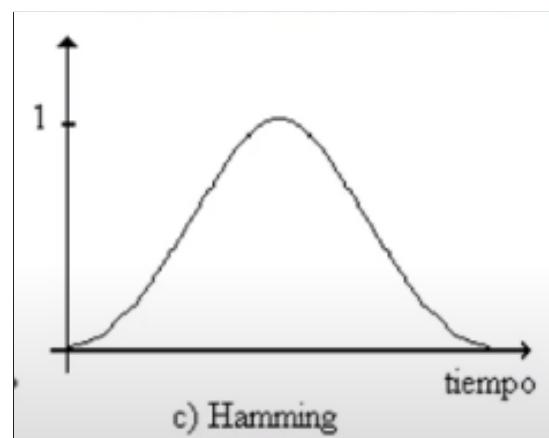
Donde se destaca los siguientes puntos

1. Frecuencia de la linea central de la pantalla.
2. Escala Vertical en dB/div donde ($0 \text{ dB} = 1 \text{ V}_{\text{RMS}}$).
3. Escala horizontal en Frec/div.
4. Velocidad de muestreo.
5. Tipo de ventana FFT.

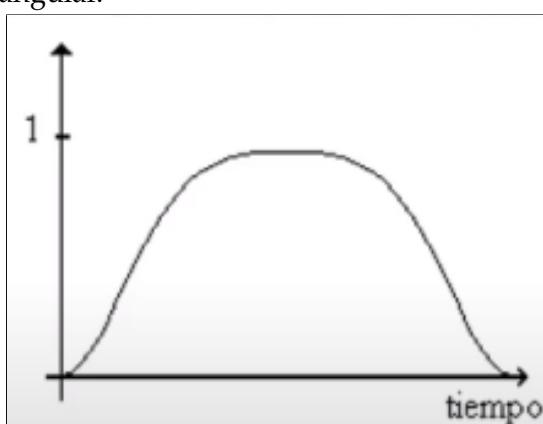
A continuación, se hace hincapié en los tipos de ventanas que se utilizaran en el presente TP como se observa en la Figura 4 indicando sus ventajas y desventajas.



(a) Ventana Rectangular.



(b) Ventana Hamming.



(c) Ventana flattop.

Figura 4: Tipos de Ventan para FFT.

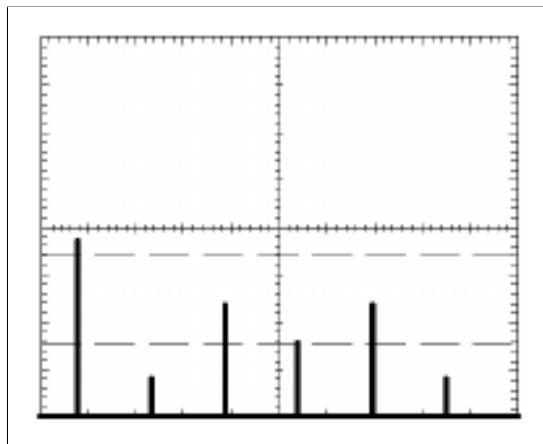
La **ventana rectangular**, Figura 4a posee como ventaja principal su gran utilidad para medir señales con transitorios rápidos. una desventaja notoria de es que, como la misma es una ventana de apertura y cierre abrupto, esto puede generar la aparición a flancos abruptos que no existen realmente en la señal, causando errores en la lectura de la misma.

La **ventana Hamming**, Figura 4b se las considera como una ventana de apertura y cierre suave a diferencia de la rectangular. Esto permite eliminar el problema de los flancos abruptos facilitando las mediciones de amplitudes de las componentes espectrales de una señal. Pero como desventaja poseen poca exactitud para realizar mediciones de frecuencias.

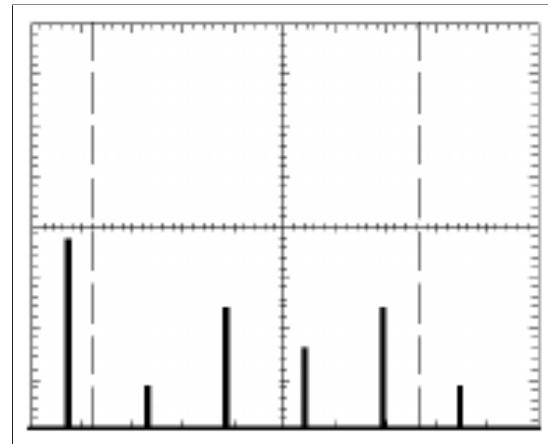
Por último la **ventana flattop**, Figura 4c es una solución de compromiso entre las dos ventanas previamente mencionadas.

Uso de Cursos

Cabe destacar, que también se para realizar las mediciones en los diferentes ensayos se utiliza los **cursores** propios del osciloscopio. Con ellos se puede realizar mediciones en amplitud (dB) o frecuencia tal como se observa en la Figura 5.



(a) Cursores en Magnitud.



(b) Cursores en Frecuencia.

Figura 5: Tipos de cursores del Osciloscopio Digital.

Se debe tener presente que cuando se realiza mediciones de magnitudes de las componentes en frecuencia con el osciloscopio, dichas magnitudes dada en decibeles está referenciada a valor de V_{RMS} y no de amplitud pico de la señal.

3. Actividad Práctica

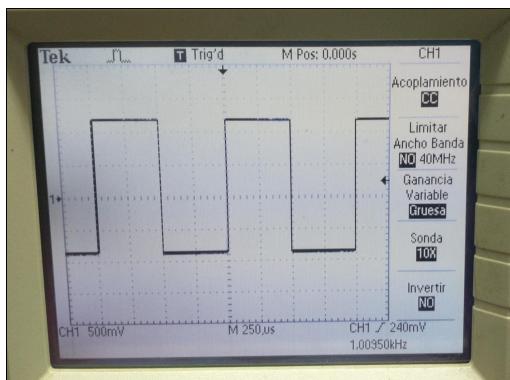
Se propone como actividad realizar el análisis de distintas señales en la frecuencia con el uso del módulo matemático de un osciloscopio digital, mediante la FFT. Con este objetivo, los instrumentos e insumos necesarios son:

- Osciloscopio digital Tektronix TDS 1001
- 2 generadores de señal Goldstar FG-8002
- Multímetro Unit UT890C
- Circuito modulador de amplitud con diodo y circuito sintonizado
- Potenciómetro de $1 k\Omega$
- Amplificador transistorizado de dos etapas

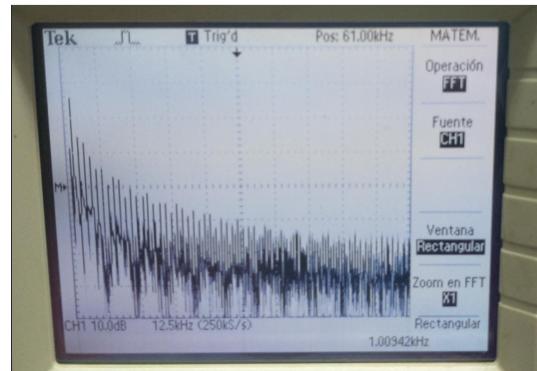
3.1. Análisis de una forma de onda cuadrada

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 6 muestra esta señal en tiempo y frecuencia.



(a) En tiempo.



(b) En frecuencia.

Figura 6: 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 7 se muestran las distintas ventanas para el modo de adquisición **normal**.

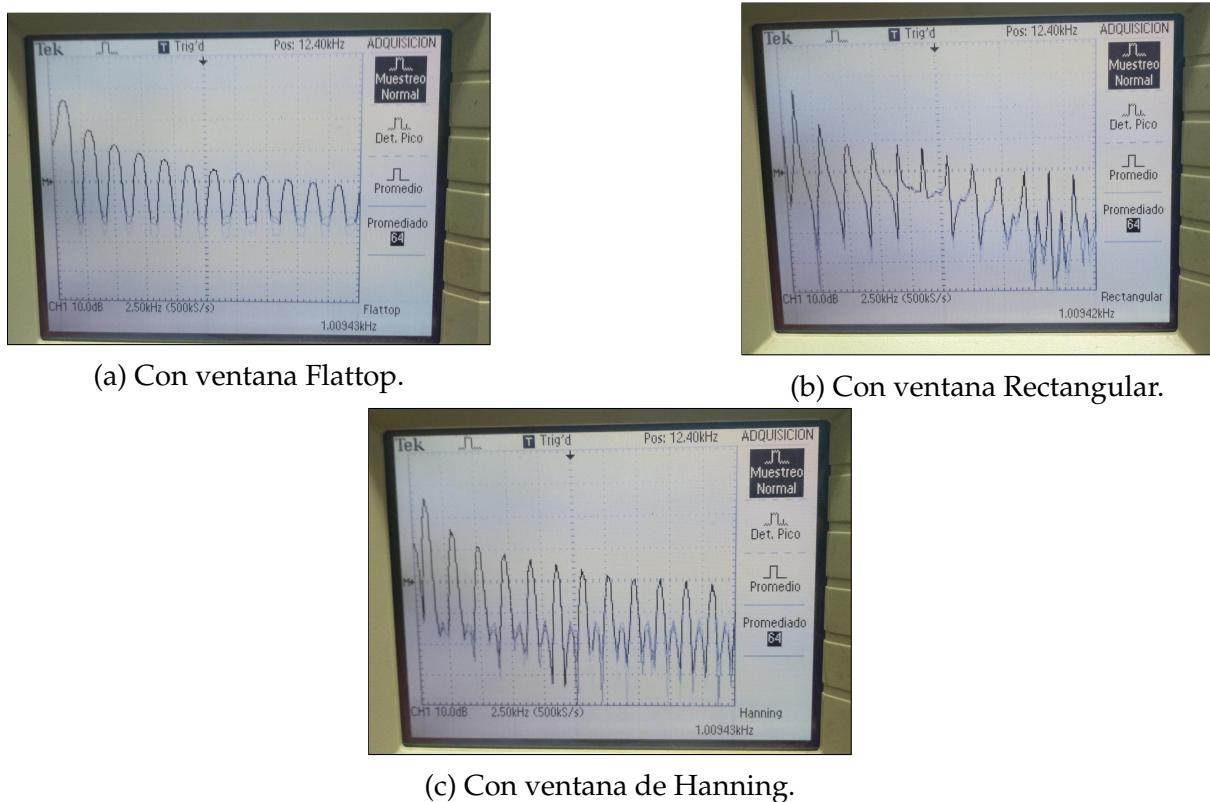


Figura 7: Señal cuadrada de 1 kHz con modo de adquisición normal.

Ahora, se selecciona el modo de adquisición de **detección de picos** y se varían los tipos de ventanas. Esto se encuentra en la Figura 8.

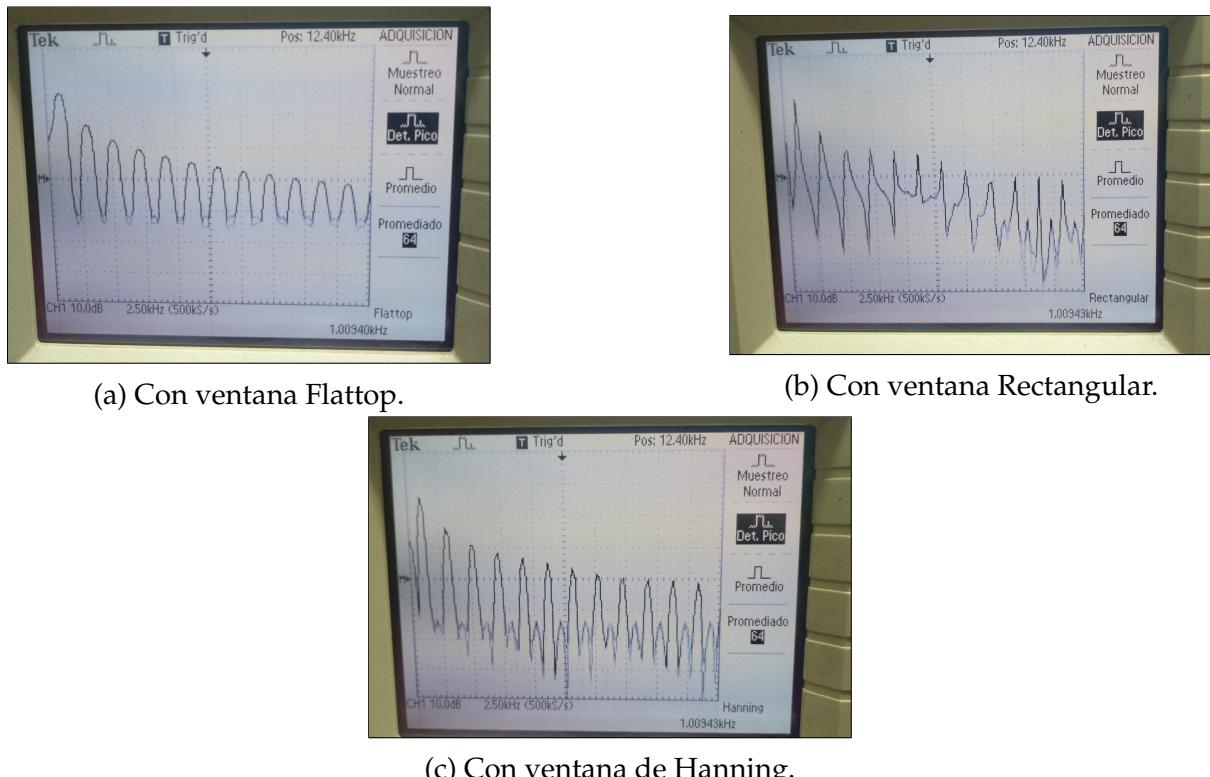
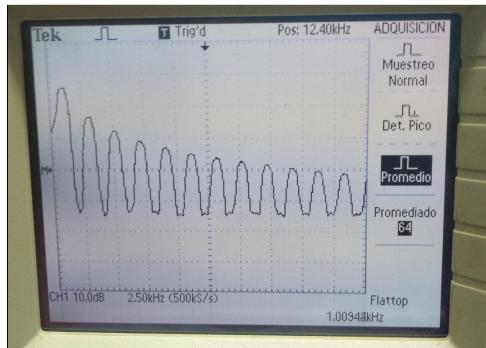
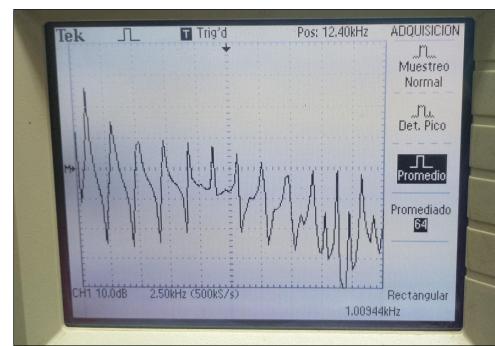


Figura 8: Señal cuadrada de 1 kHz con modo de adquisición de detección de picos.

Finalmente, se pone a prueba el modo de adquisición **promedios**, para el cual se eligen **64 cuentas**. Esto se encuentra en la Figura 9.



(a) Con ventana Flattop.



(b) Con ventana Rectangular.



(c) Con ventana de Hanning.

Figura 9: Señal cuadrada de 1 kHz con modo de adquisición de promedios.

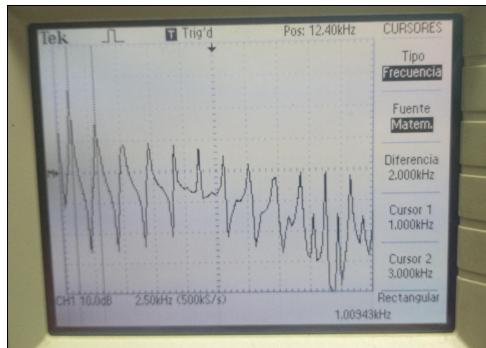
3.1.1. Medición de frecuencia

Para medir las **frecuencias** de los armónicos de la señal se hace uso de los cursores del osciloscopio. Además, se selecciona el modo de adquisición **Promedio** con 64 cuentas, y la ventana **Rectangular**. Los valores se encuentran en la Tabla 1.

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.

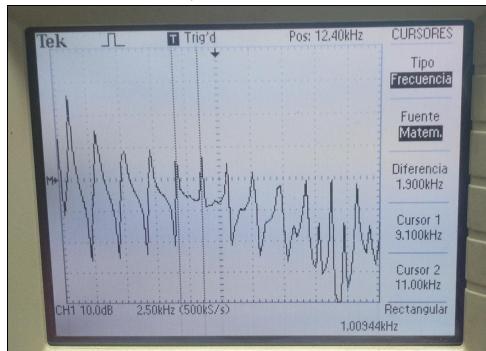
Las capturas con las mediciones de frecuencia realizadas con el osciloscopio se encuentran en la Figura 10.



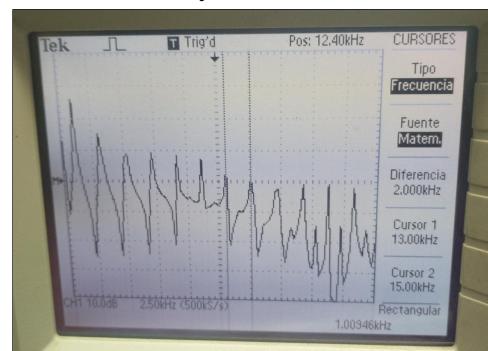
(a) 1er y 2do armónico.



(b) 3er y 4to armónico.



(c) 5to y 6to armónico



(d) 7mo y 8vo armónico.

Figura 10: Frecuencias de los primeros 7 armónicos de la señal.

3.1.2. Medición de amplitud

Por último, se procede a medir la **amplitud** de las componentes espectrales de la señal. Para ello, se hace uso de los cursores del osciloscopio, previamente habiendo seleccionado la ventana **Flattop**. Vale aclarar que el osciloscopio realiza las mediciones en decibeles referenciados a 1 V (**dBv**). En la Tabla 2 se encuentran tabulados los resultados de la medición.

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]	-0,79	-10,2	-14,6	-17,8	-20	-21,4	-23,3
[V]	0,913	0,309	0,186	0,129	0,1	0,085	0,068
[V ²]	0,834	0,095	0,035	0,016	0,01	0,007	0,005

Tabla 2: Amplitudes de las primeras 7 componentes espectrales.

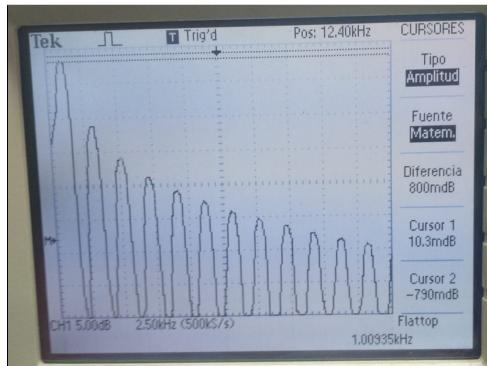
Partiendo del Teorema de Parseval, se puede obtener el valor eficaz de la señal mediante la amplitud de sus componentes espectrales

$$V_{RMS} = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + V_5^2 + V_6^2 + V_7^2}$$

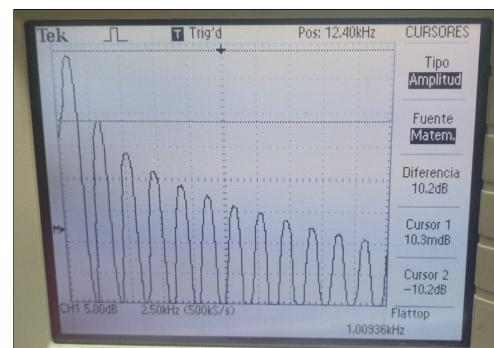
$$\Rightarrow V_{RMS} = \sqrt{0,834 + 0,095 + 0,035 + 0,016 + 0,01 + 0,007 + 0,005}$$

$$\therefore V_{RMS} = 1,00 [V]$$

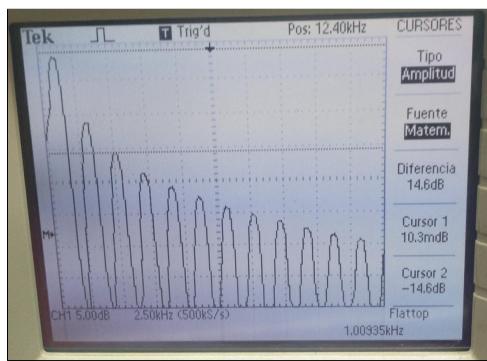
Las capturas de las mediciones realizadas de las primeras cuatro componentes armónicas se encuentran en la Figura 11.



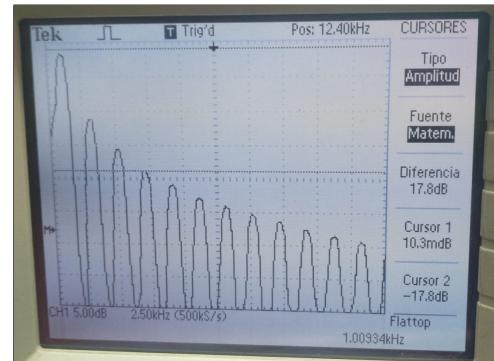
(a) 1er armónico.



(b) 2do armónico.



(c) 3er armónico.



(d) 4to armónico.

Figura 11: Amplitudes de las primeras 4 componentes espectrales de la señal.

Como corroboración, se hace uso de la herramienta del osciloscopio que permite medir el valor eficaz de una señal en el tiempo. El valor coincide con el calculado mediante las componentes espectrales - véase Figura 12.

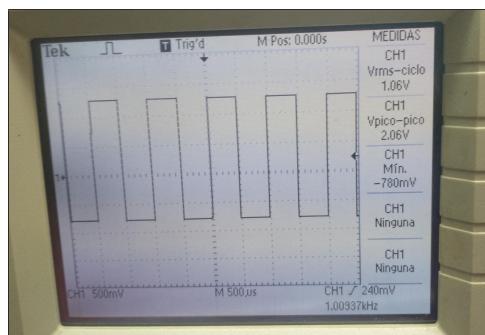
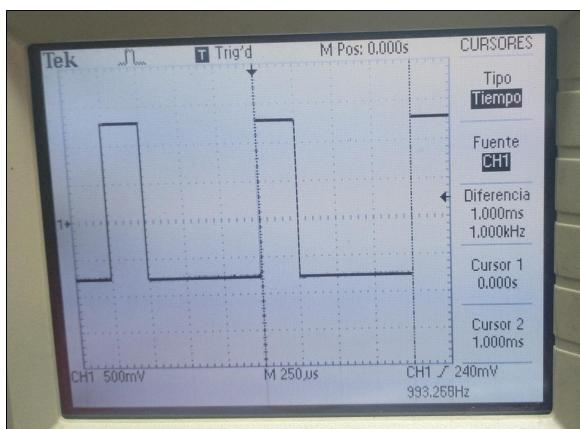


Figura 12: Corroboration del valor de tensión eficaz de la señal.

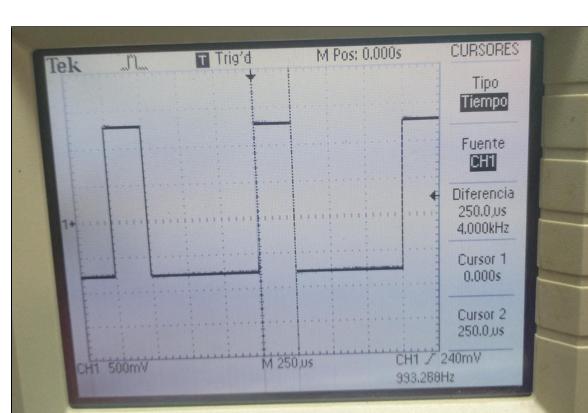
3.2. Análisis de un tren de pulsos

Se analiza a continuación una señal con forma de onda de tren de pulsos rectangulares, en el dominio de la frecuencia. Se sabe que la relación de período en el dominio del tiempo y ancho de banda en el dominio de la frecuencia, es inversamente proporcional. Es por ello, que se utiliza una señal de pulsos rectangulares, para poder visualizar dicha relación.

Se configura el generador de la siguiente manera: período de **1 ms**, ancho de pulso de **250 μ s**, y se gira media vuelta la perilla de control de amplitud. El ajuste del generador se observa en el osciloscopio en la Figura 13.



(a) Señal pulsante de período de 1 ms.



(b) Ancho del pulso de 250 μ s.

Figura 13: Tren de pulsos.

Ahora, se cambia al modo matemático a través del botón **MATH MENU**, y se configura con: **FFT**, **CH1**, **Rectangular**, **Zoom X1** y modo adquisición **Promedio** en 64 muestras. Dicha configuración se enseña en la Figura 14.

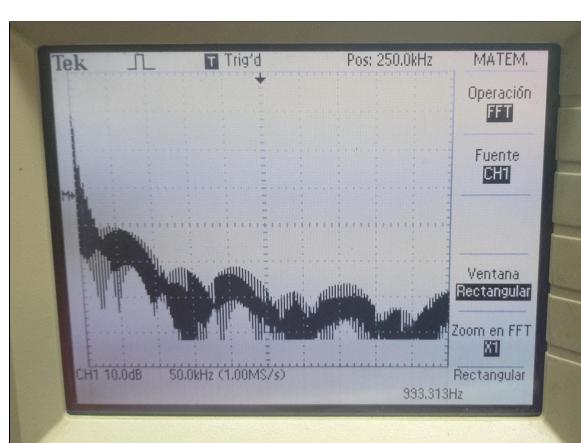


Figura 14: Análisis en frecuencia de la señal de entrada.

Luego, se observa cómo varía el espectro entre los 3 tipos de ventana: **Hanning**, **Rectangular**, y **Flattop**, lo cual se ve en la Figura 15.

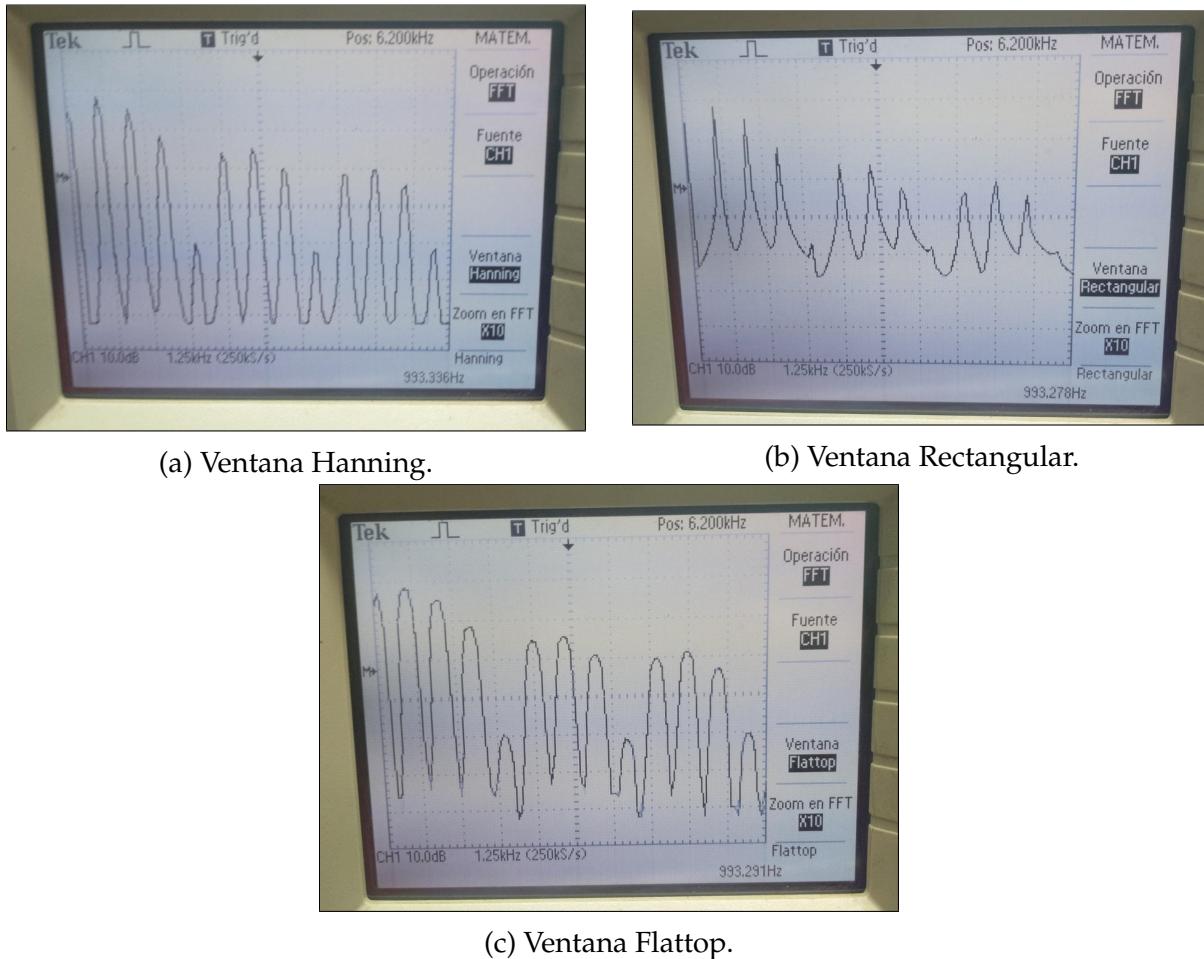
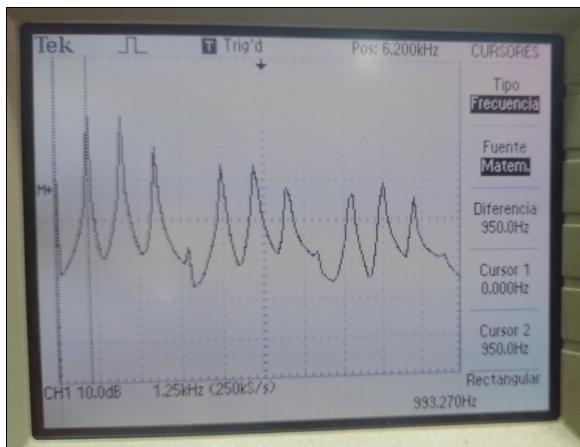
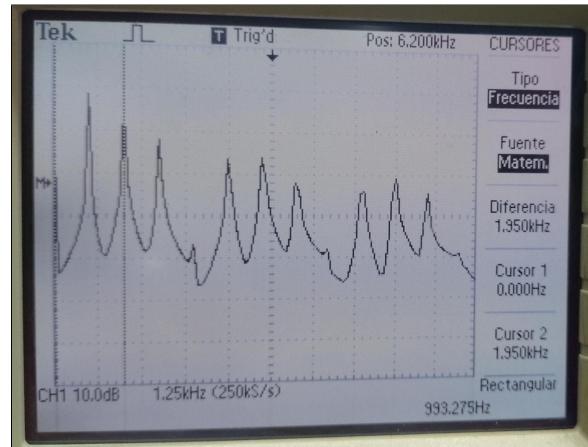


Figura 15: Análisis en frecuencia con las distintas ventanas.

A continuación, se selecciona ventana **Rectangular**, se coloca el menú de cursores, y se selecciona **frecuencia** en fuente **Matemático**. Se coloca el **Cursor 1**, en 0 Hz y con el **Cursor 2** se procede a medir las frecuencias de cada pico, como muestra la Figura 16.



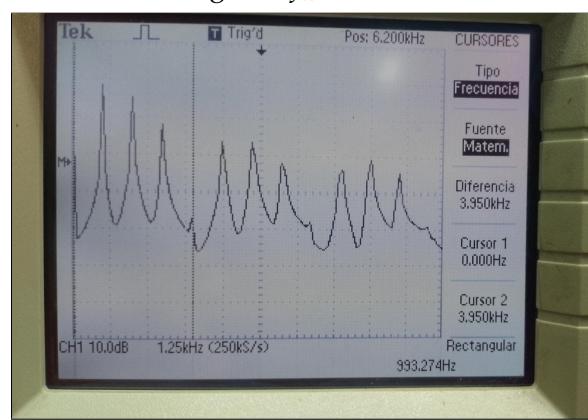
(a) Frecuencia de la fundamental en ventana Rectangular, $f_1 = 950 \text{ Hz}$.



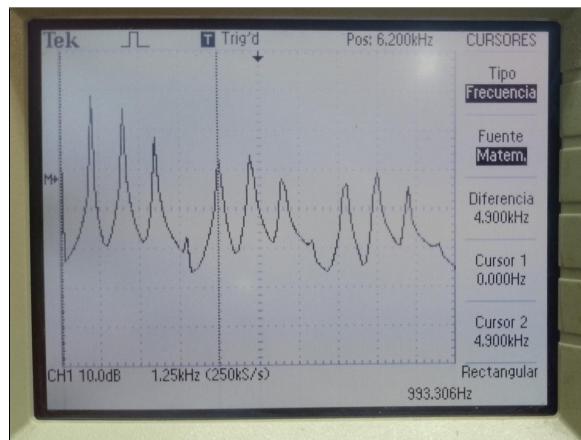
(b) Frecuencia de la segunda armónica en ventana Rectangular, $f_2 = 1950 \text{ Hz}$.



(c) Frecuencia de la tercera armónica en ventana Rectangular, $f_3 = 2950 \text{ Hz}$.



(d) Frecuencia de la cuarta armónica en ventana Rectangular, $f_4 = 3950 \text{ Hz}$.



(e) Frecuencia de la quinta armónica en ventana Rectangular, $f_5 = 4900 \text{ Hz}$.

Figura 16: Medición de frecuencia de picos de la señal pulsante en ventana Rectangular.

Se confecciona una tabla con las **diferencias de frecuencia** entre picos, en base a las mediciones realizadas. Los valores se encuentran en la Tabla 3.

Cursor 2	1erArm.	2daArm.	3raArm.	4taArm.	5taArm.
Δf_n [Hz]	950	1000	1000	1000	950

Tabla 3: Valores de frecuencia medidos en ventana Hanning.

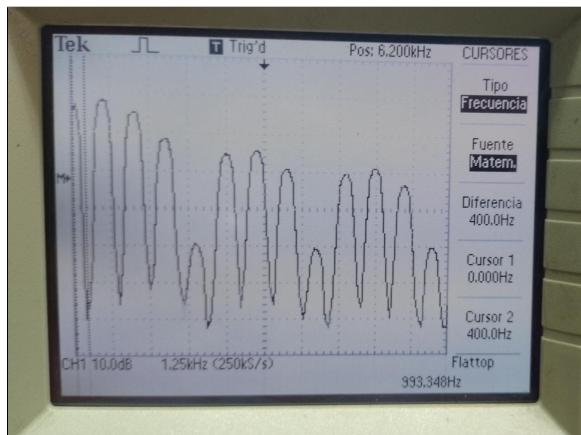
Se calcula el promedio de las frecuencias como sigue

$$\Delta f_{n_{\text{prom}}} = \frac{\sum \Delta f_n}{n} \quad \therefore \quad \boxed{\Delta f_{n_{\text{prom}}} = 980 \text{ [Hz]}},$$

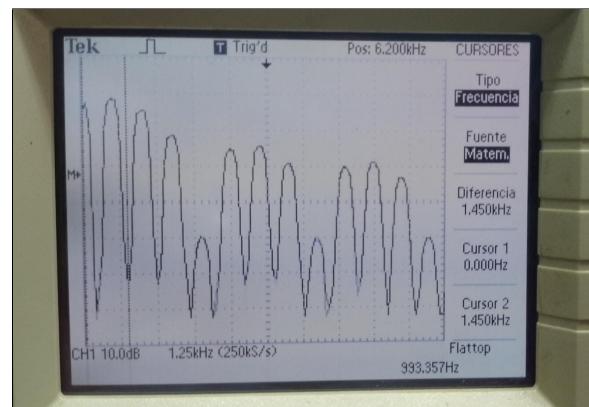
y el período de la onda de pulsos es

$$\text{Periodo } (T) = \frac{1}{\Delta f_{n_{\text{prom}}}} \quad \therefore \quad \boxed{\text{Periodo } (T) = 1,02 \text{ [ms]}}.$$

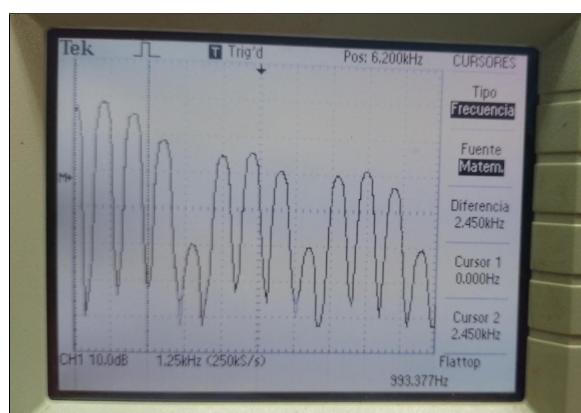
Se repite el experimento utilizando la ventana **Flattop**, pero ésta vez se miden los **valles** que presenta el espectro, que se visualiza en la Figura 17.



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



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



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

Figura 17: Medición de frecuencia de valles de la señal pulsante en ventana Flattop.

Se confecciona una tabla con los valores obtenidos, los mismos se encuentran en la Tabla 4, y se calculan nuevamente el $\Delta f_{n_{\text{prom}}}$ y el período.

$\Delta_{f\min 1}$	$\Delta_{f\min 2}$	$\Delta_{f\min 3}$
400 Hz	1050 Hz	1000 Hz

Tabla 4: Valores de frecuencia medidos en ventana Flattop.

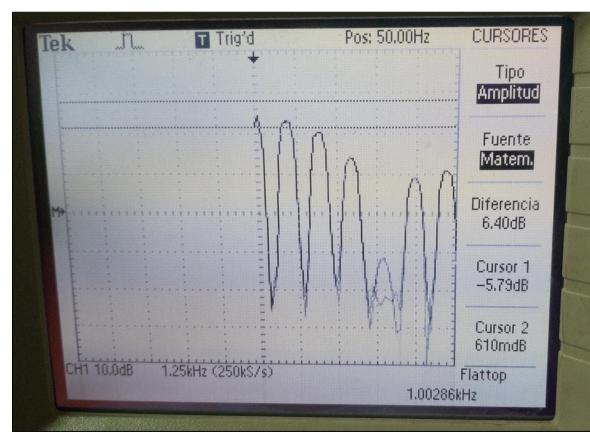
$$\Delta_{fn_{prom}} = \frac{\sum \Delta_{fn}}{n} \quad \therefore \quad \boxed{\Delta_{fn_{prom}} = 816,67 [Hz]}$$

$$Periodo (T) = \frac{1}{\Delta_{fn_{prom}}} \quad \therefore \quad \boxed{Periodo (T) = 1,224 [ms]}$$

Finalmente, se mide la amplitud de la frecuencia correspondiente a 0 Hz, y se mide también con multímetro el nivel de continua de la señal, posteriormente se comparan los resultados.



(a) Medición de continua con osciloscopio, $CC_{osc} = 1 V$.



(b) Medición de continua con multímetro, $CC_{Mult} = 1 V$.

Figura 18: Medición del nivel de continua de la señal pulsante.

La medición realizada con el osciloscopio da como resultado $V_{rms} = 0,513 V$, lo cual coincide con la medición realizada con el multímetro.

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.

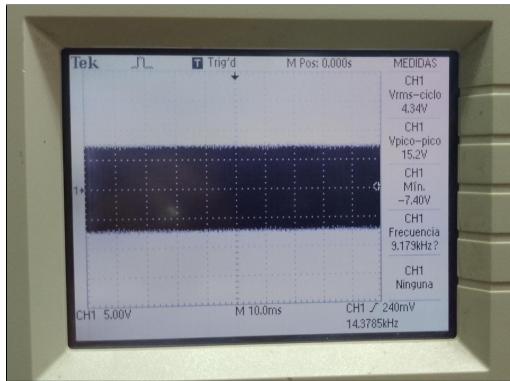
3.3.1. Aliasing con señal senoidal

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

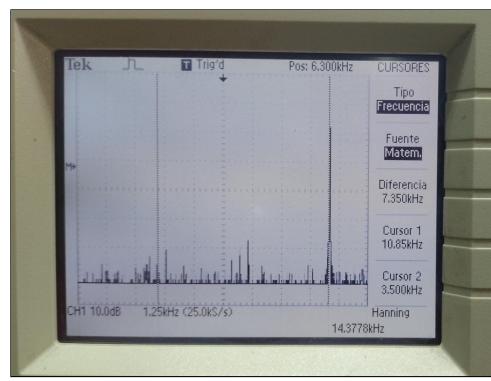


Figura 19: Muestreo de señal de 10 kHz con $f_s = 25 \text{ kSa/s}$ (sin aliasing).

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



(a) En tiempo.

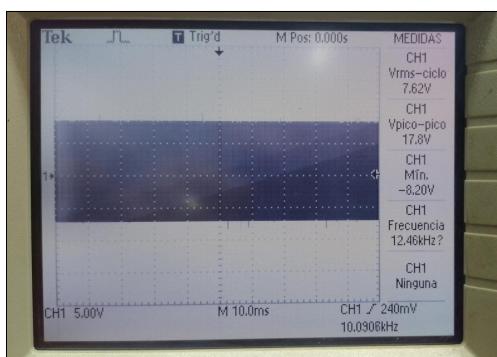


(b) En frecuencia.

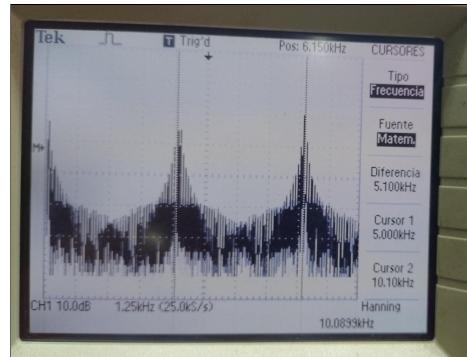
Figura 20: Muestreo de señal senoidal de 14 kHz con $f_s = 25 \text{ kSa/s}$ (con aliasing).

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 21.



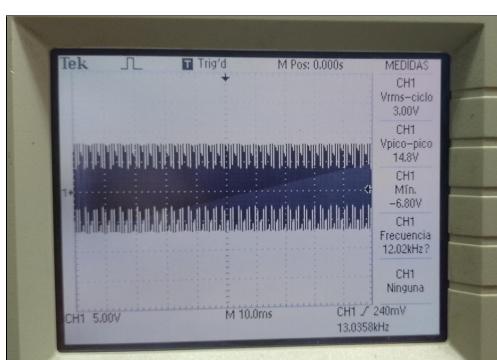
(a) $f = 10 \text{ kHz}$.



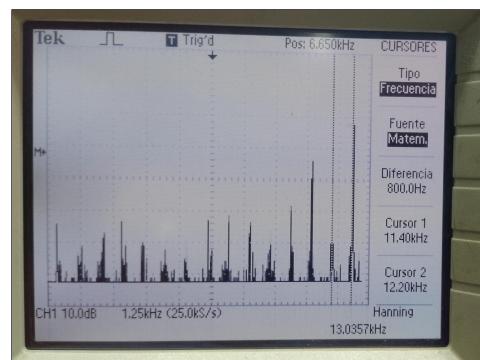
(b) En frecuencia.

Figura 21: 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 22 se muestra lo mencionado, en donde aparecen frecuencias que no son propias de la señal cuadrada.



(a) En tiempo.



(b) En frecuencia.

Figura 22: 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 23. Mediante el espectro se puede medir frecuencia, pero también las amplitudes, de portadora y bandas laterales para este caso, lo que permite calcular el índice de modulación, el cual es un parámetro importante a tener en cuenta.

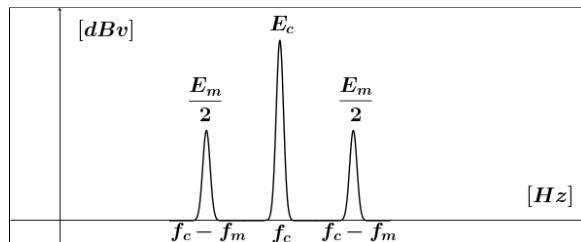


Figura 23: Ejemplo de espectro de una señal AM.

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

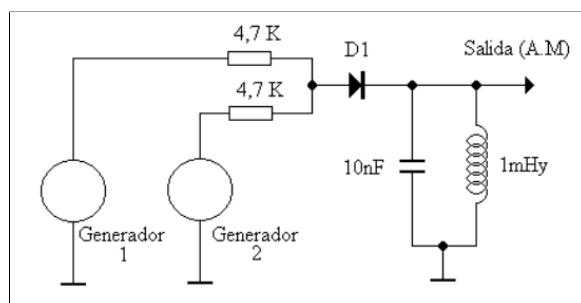
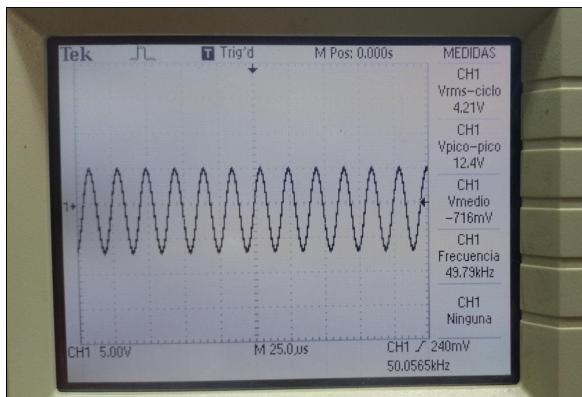


Figura 24: Circuito de modulación en amplitud.

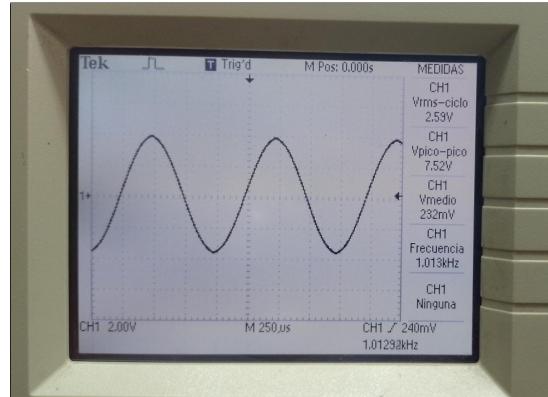
Con el generador **G1** se inyecta una señal senoidal que actúa como **portadora** de frecuencia $f_c = 50 \text{ kHz}$, y con el generador **G2** se inyecta la señal **modulante** de frecuencia $f_m = 1 \text{ kHz}$, que puede ser senoidal, triangular o cuadrada. Las amplitudes utilizadas mantienen 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 25.



(a) Portadora.



(b) Banda base senoidal.

Figura 25: 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 26.

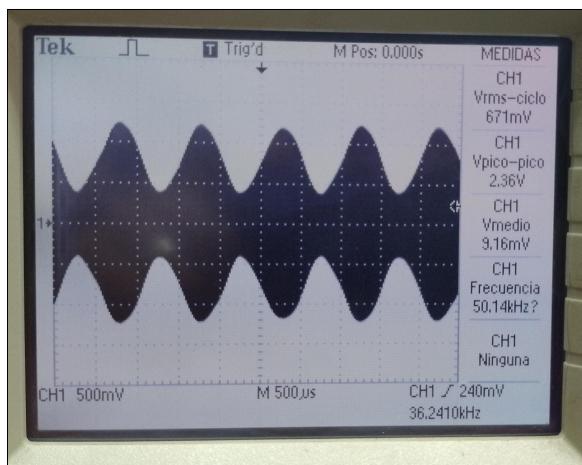


Figura 26: Señal AM con seno como modulante.

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 la frecuencias. Dichas mediciones se pueden apreciar en la Figura 27, y los valores se encuentran tabulados en la Tabla 5.



(a) Frecuencia BLInf.

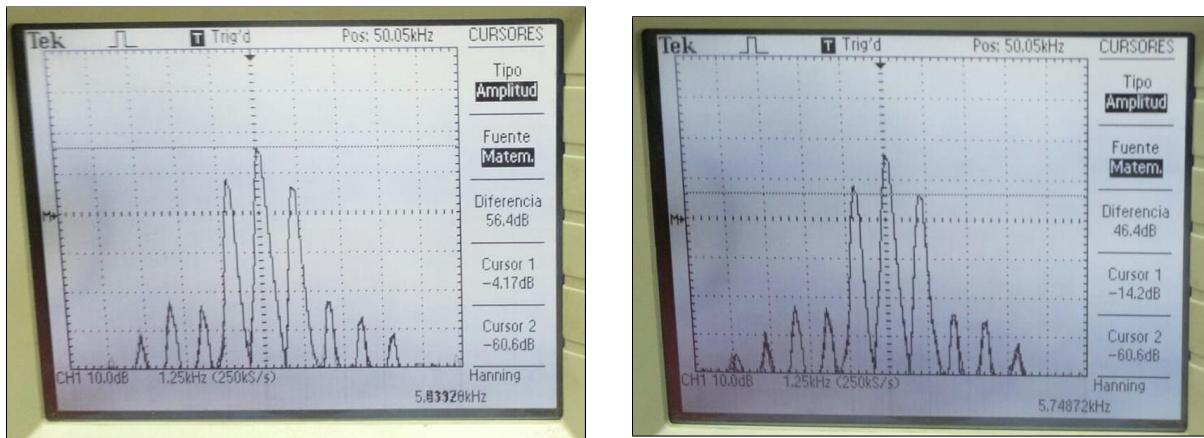
(b) Frecuencia BLSup.

Figura 27: 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 28 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 28: Amplitudes de la señal AM con el seno como modulante.

Ampl. BLSuperior	Ampl. Portadora	Índice m	Índice m
-14,2 dBv	-4,17 dBv	-4,03 dB	0,63

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 29.

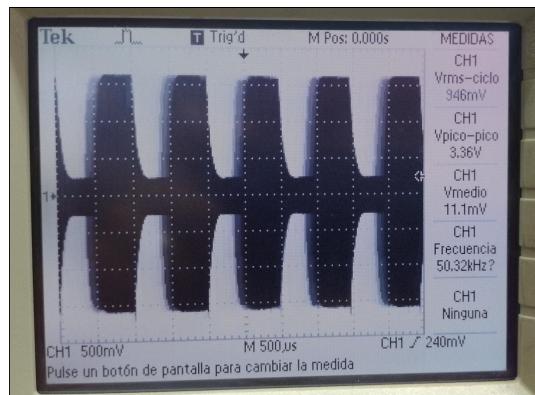
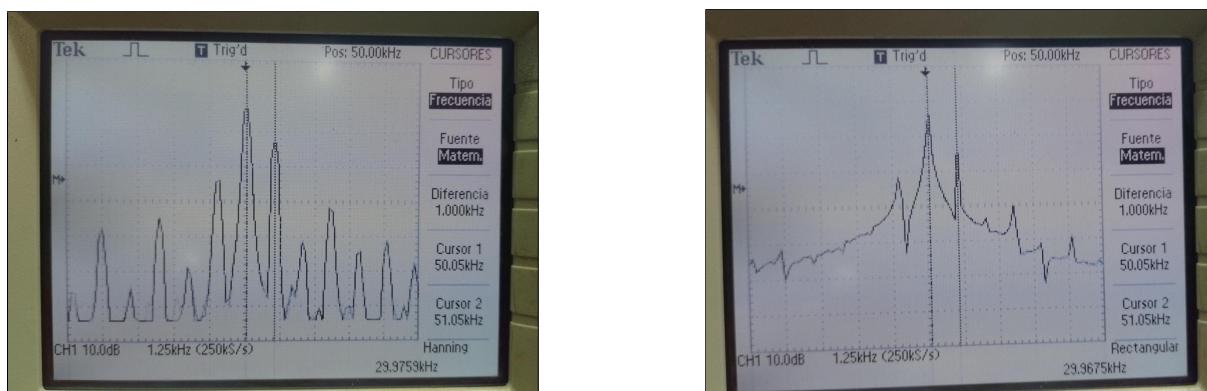


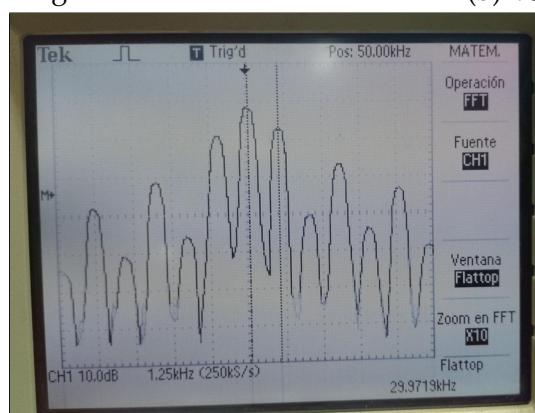
Figura 29: Señal AM con onda cuadrada como modulante.

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 30 se puede apreciar lo mencionado.



(a) Ventana Hanning.

(b) Ventana Rectangular.



(c) Ventana Flattop.

Figura 30: 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 31.

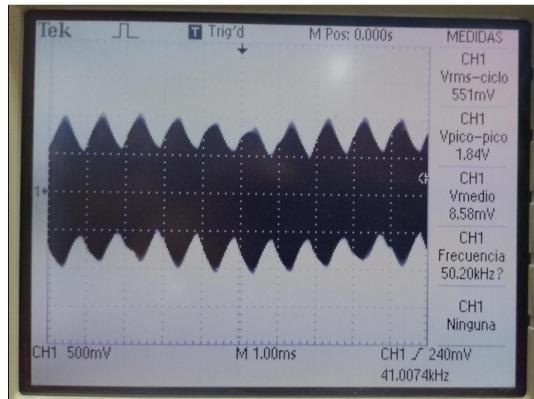
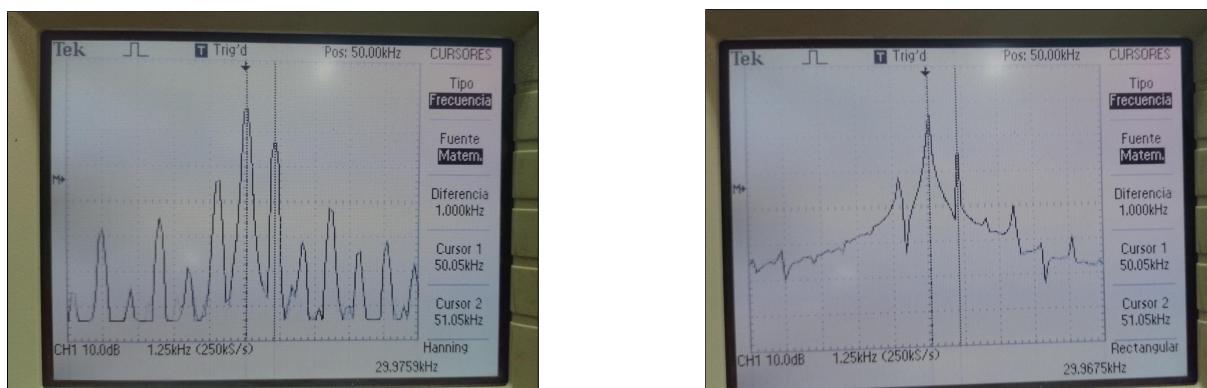


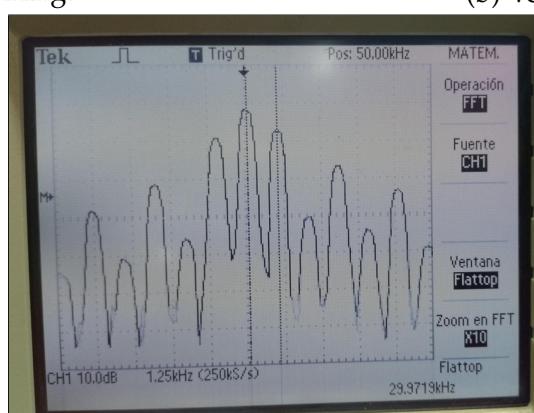
Figura 31: Señal AM con onda triangular como modulante.

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 32 se puede apreciar lo mencionado.



(a) Ventana Hanning.

(b) Ventana Rectangular.



(c) Ventana Flattop.

Figura 32: 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 24 de la Sección 3.4.

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

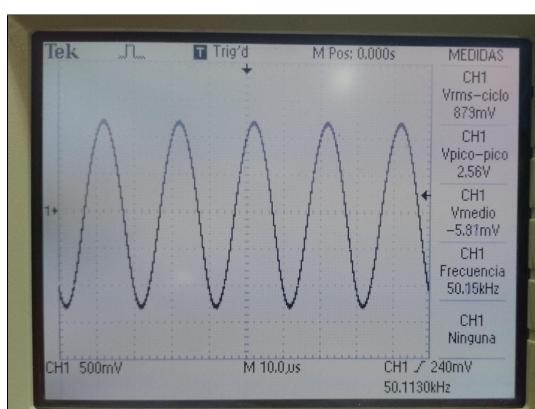
$$v_{AM} = k_a(v_{G1} + v_{G2}) + k_b(v_{G1} + v_{G2})^2 + k_c(v_{G1} + v_{G2})^3 + \dots,$$

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

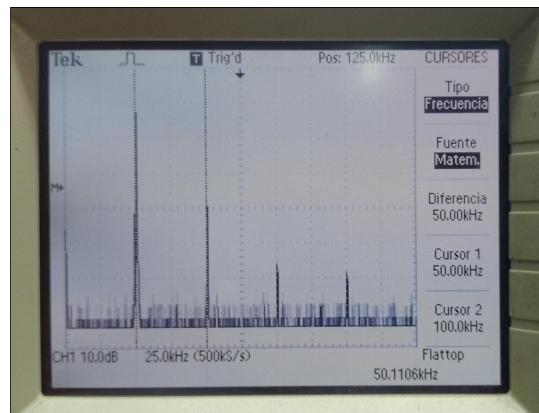
$$v_{AM} = \dots + k_b(v_{G1}^2 + 2 \cdot v_{G1}v_{G2} + v_{G2}^2) + \dots$$

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 33 y 34.

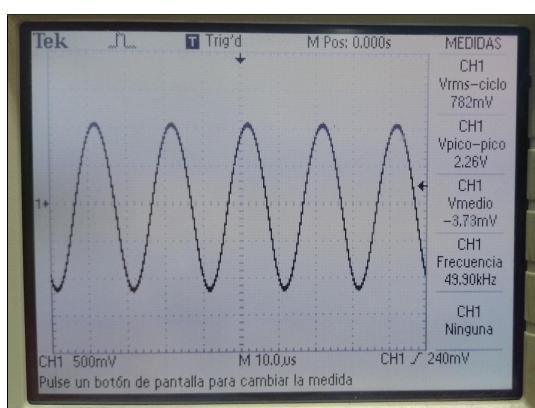


(a) En tiempo.

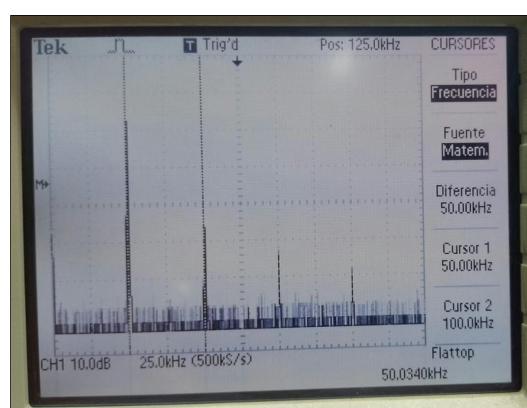


(b) En frecuencia.

Figura 33: Salida del circuito con el generador G1 encendido.



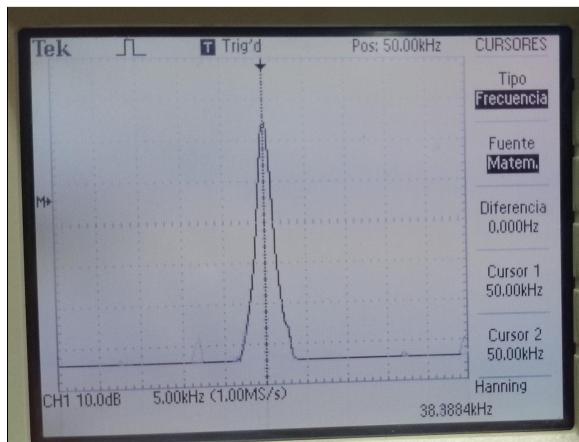
(a) En tiempo.



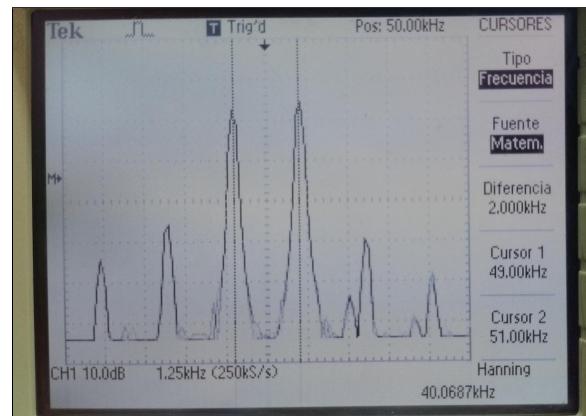
(b) En frecuencia.

Figura 34: 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 35 se puede ver lo explicado en este párrafo.



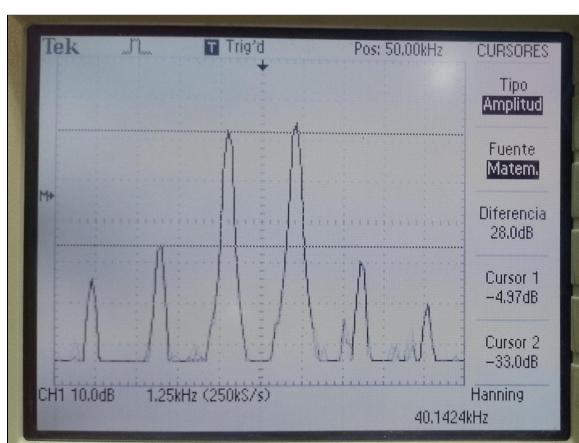
(a) Ambas a la misma frecuencia.



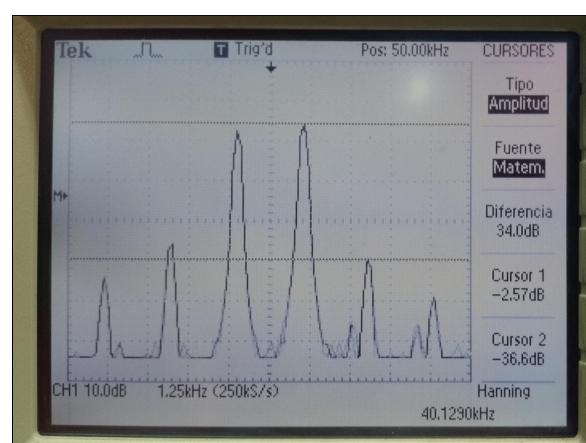
(b) Con separación de 2 kHz.

Figura 35: 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 obtener 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 36.



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



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

Figura 36: 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 3°
49 kHz	51 kHz	47 kHz	53 kHz	28 dB

Tabla 7: 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 conexionado de la Figura 37.

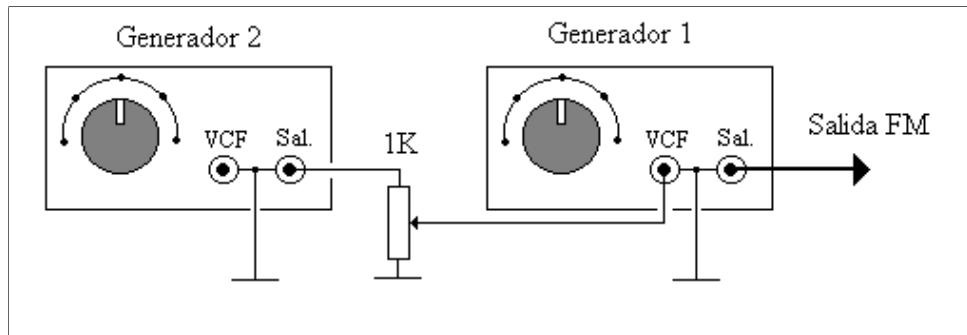


Figura 37: Conexión de los generadores.

El instrumental utilizado se enseña en la Figura 38.

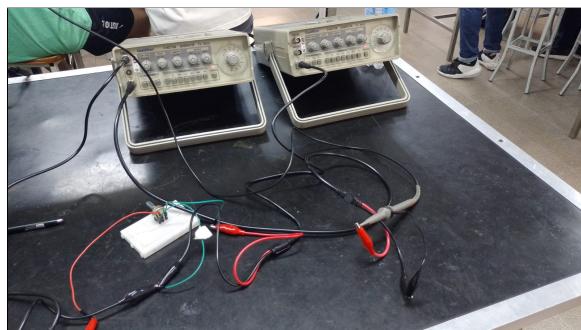


Figura 38: Montaje del circuito FM.

Inicialmente, se procede a ajustar los generadores. La frecuencia de G1 se establece en $f_{G1} = 50 \text{ kHz}$, y se gira el control de amplitud media vuelta. Por otro lado, se ajusta la frecuencia de G2 a $f_{G2} = 1 \text{ kHz}$. El seteo de los generadores se observa en la Figura 39.

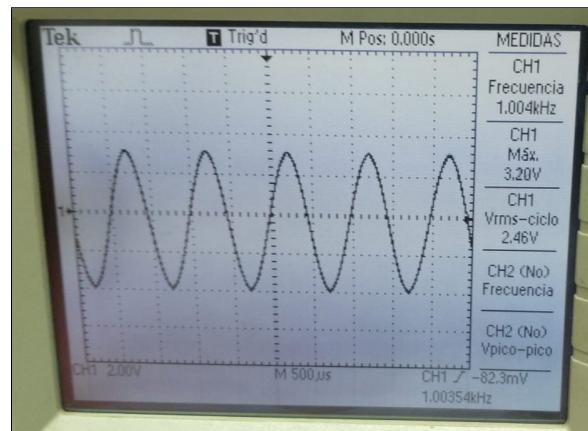
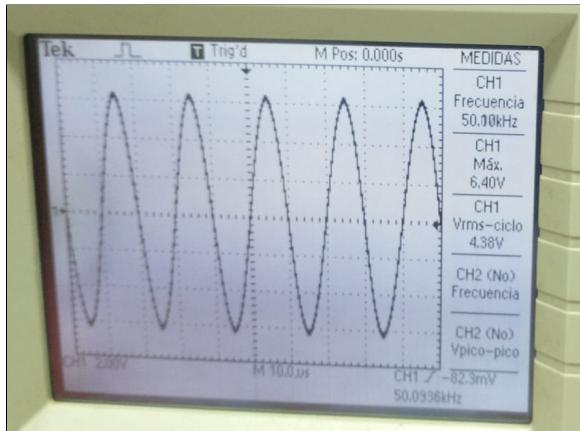


Figura 39: Calibración de los generadores.

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 40.

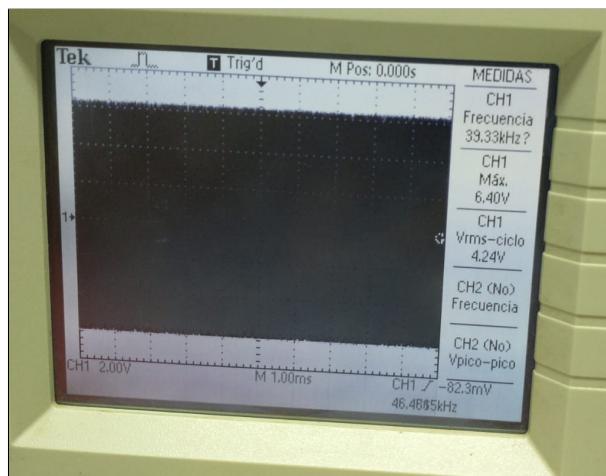
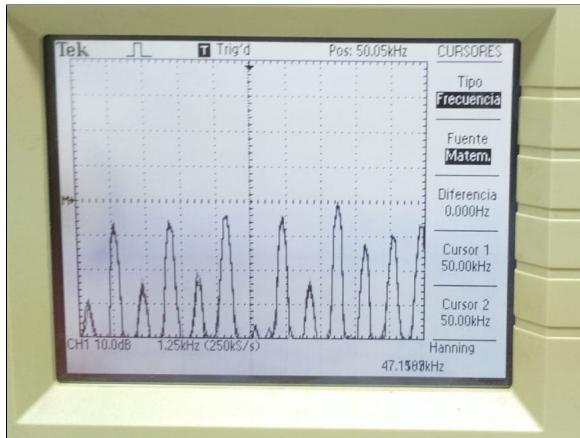
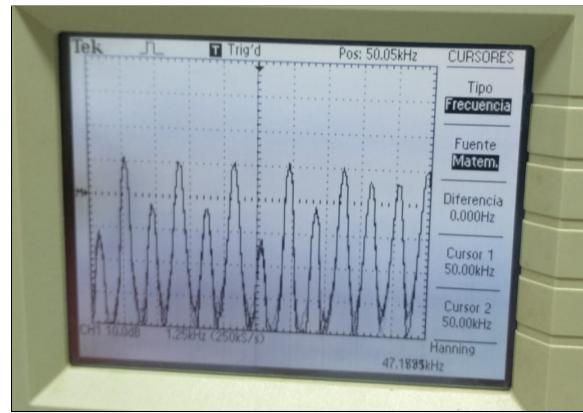


Figura 40: Señal modulada en frecuencia con base de tiempos de 1 ms.

Siguiendo el procedimiento, se configura el menú matemático de la siguiente manera: **Hanning**, **Zoom X10**, y modo adquisición **Promedio** en 64 muestras. La salida FM configurada, se observa en frecuencia en la Figura 41.



(a) FM con promedios.



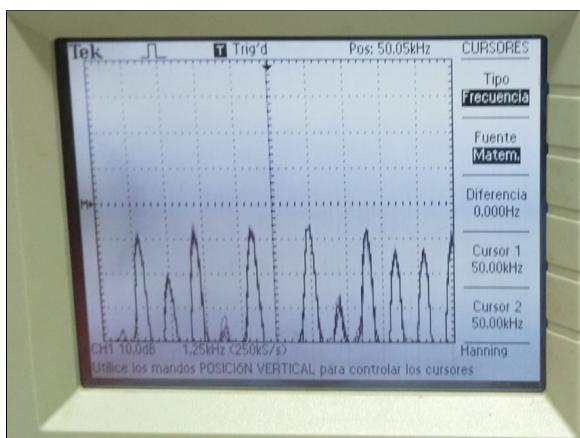
(b) Adquisición normal.

Figura 41: Generación de señal FM observada en frecuencia.

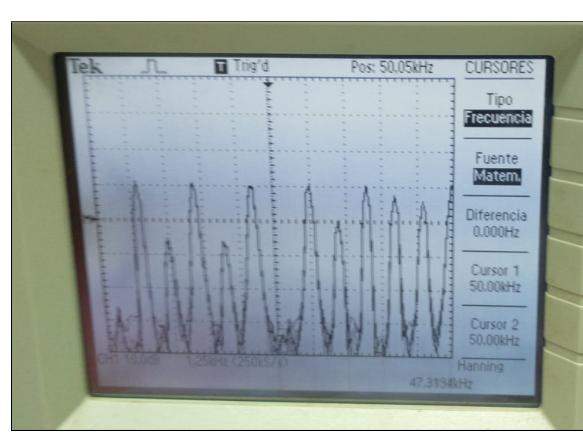
Se procede a modificar el índice de modulación, el cual responde a la siguiente ecuación:

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

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 42.



(a) Salida FM usando adquisición promedio.



(b) Salida FM usando adquisición normal.

Figura 42: 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 43.

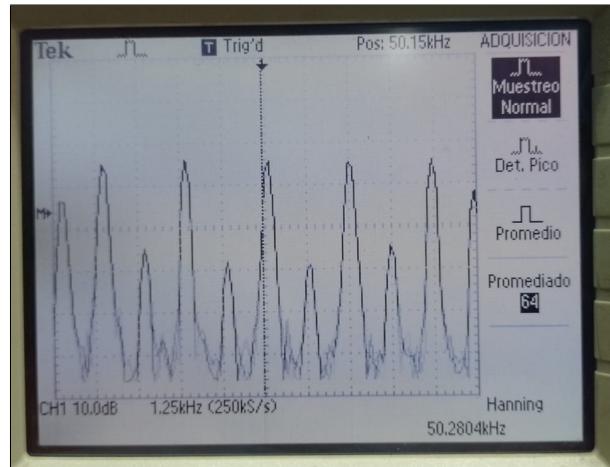
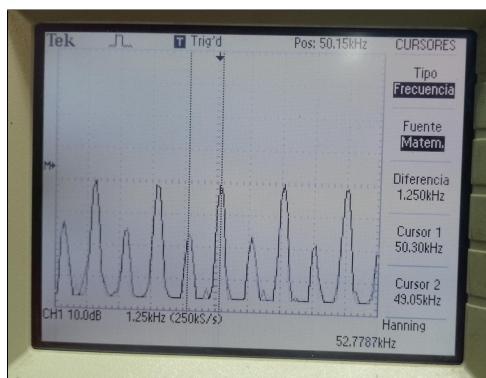
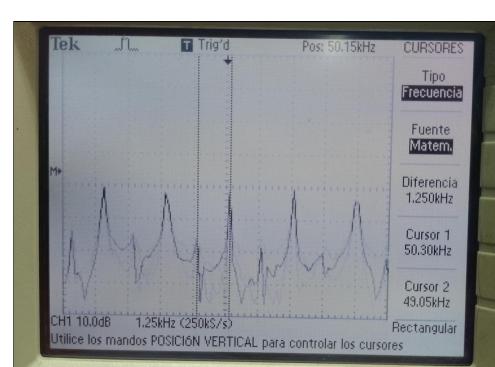


Figura 43: Índice ligeramente disminuido.

Se procede a cambiar la salida de onda modulante (generador G2), a onda cuadrada y triangular. Se observa el cambio en el espectro en la Figuras 44 y 45 para señal cuadrada y triangular respectivamente, además se cambia el tipo de ventana entre Hanning, Rectangular y Flattop.



(a) Con ventana Hanning.



(b) Con ventana Rectangular.



(c) Con ventana Flattop.

Figura 44: Onda cuadrada como señal modulante.

Se inyecta una señal triangular y se ven distintas ventanas.

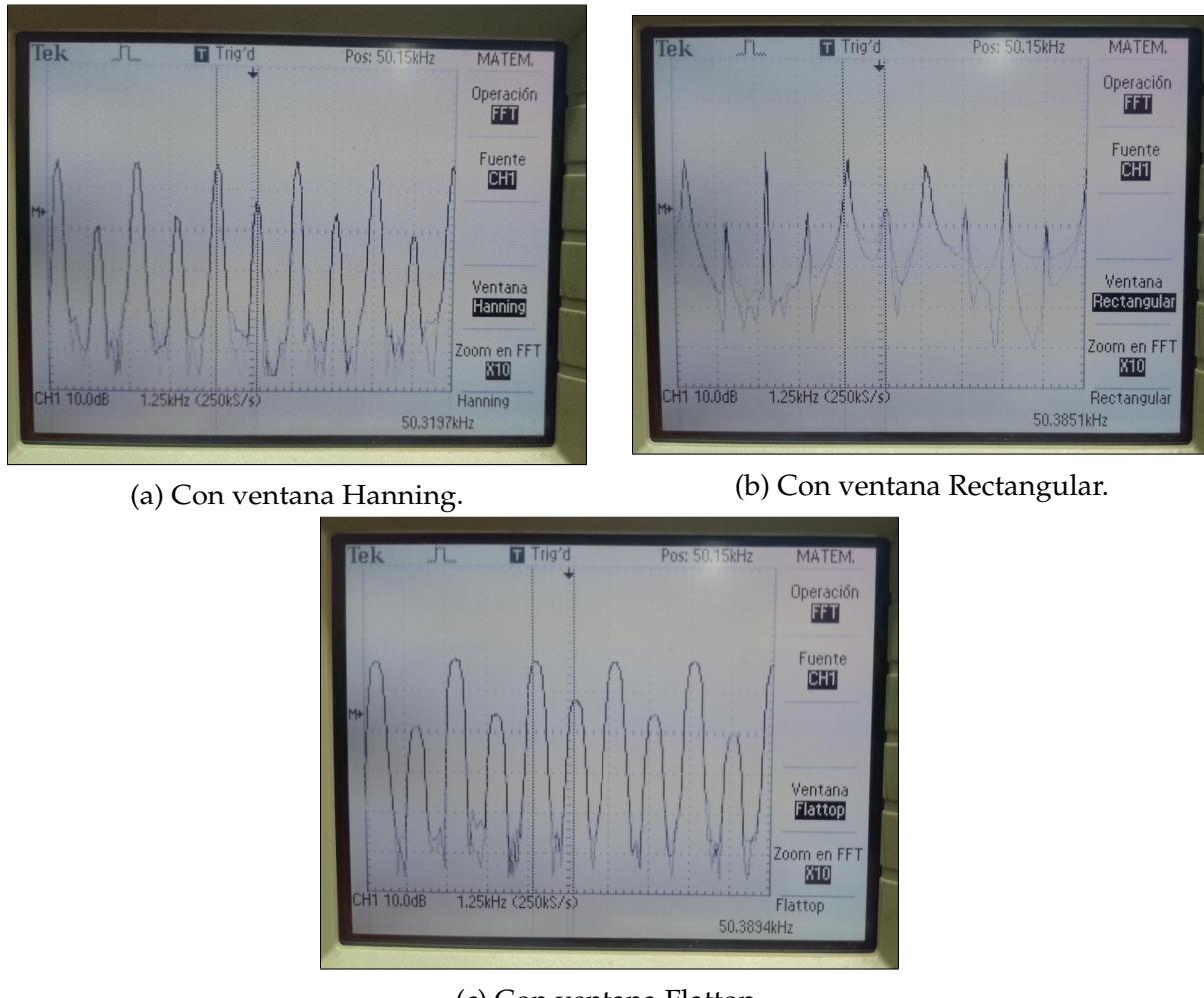
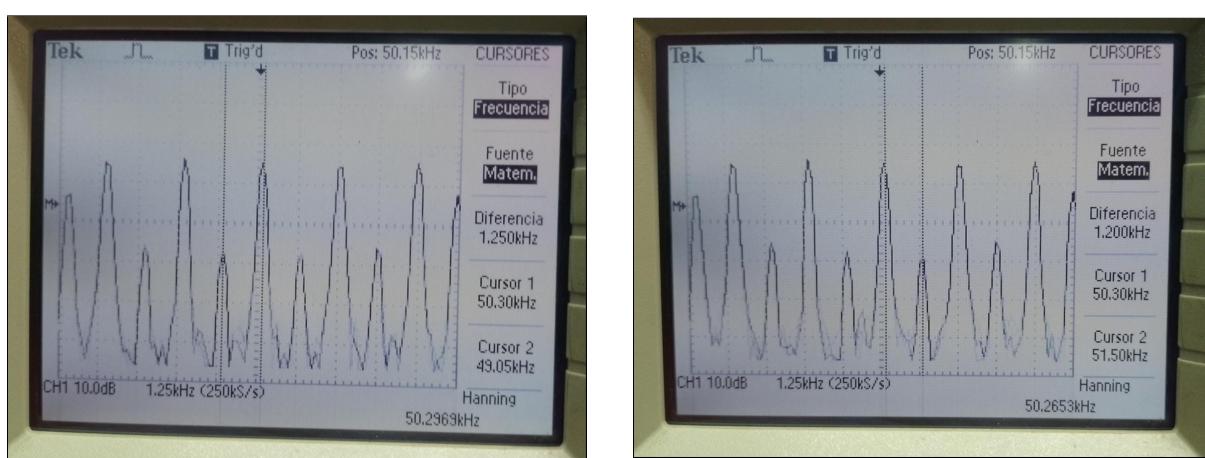


Figura 45: Onda triangular como señal modulante.

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.

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



De la Figura 46b se observa un valor de $f_{Portadora} = 50,3 \text{ kHz}$ y $f_{BLateral} = 51,5 \text{ kHz}$, reemplazando éstos valores en la ecuación (3) se tiene

$$f_{Modulante} = |50,3 \text{ kHz} - 51,5 \text{ kHz}| \quad \therefore \quad f_{Modulante} = 1,2 \text{ [kHz]} .$$

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 47.

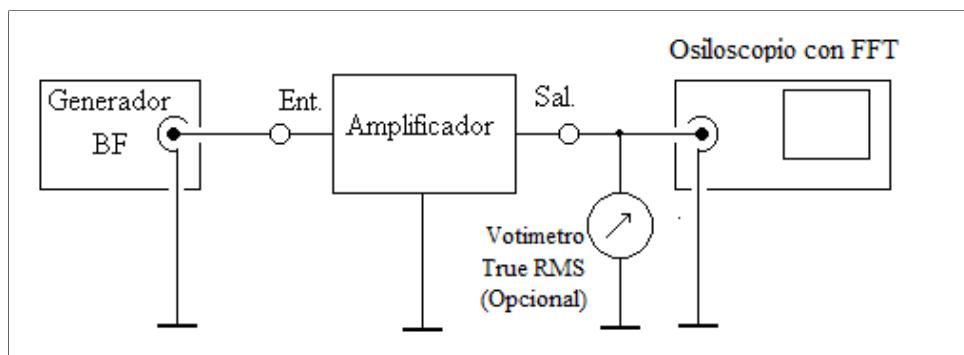
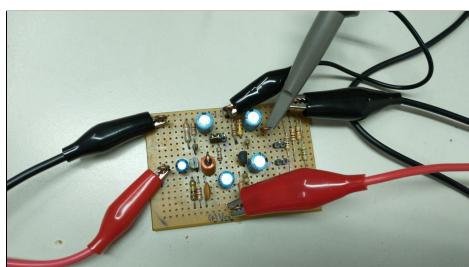
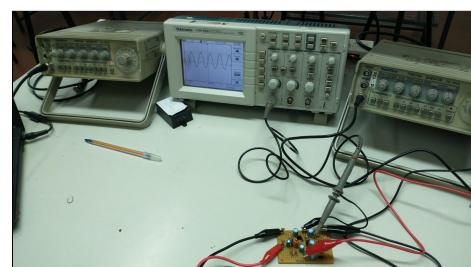


Figura 47: Esquema del circuito a implementar.

En la Figura 48 se muestran los dispositivos y el instrumental a usar.



(a) Amplificador a utilizar.



(b) Instrumental a utilizar.

Figura 48: 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 49 muestra dicho punto de máxima excursión.

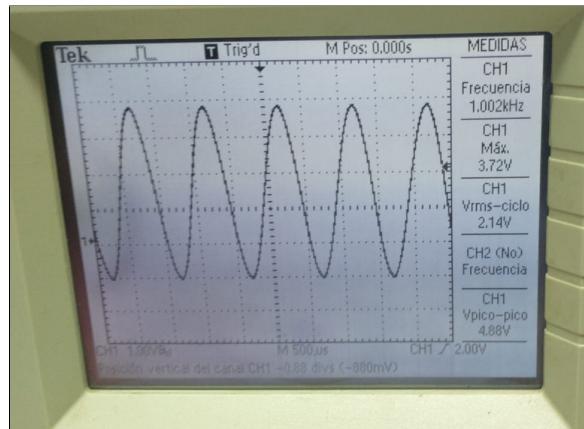
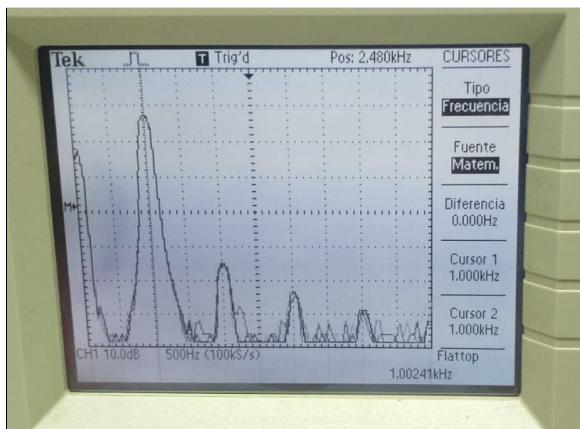
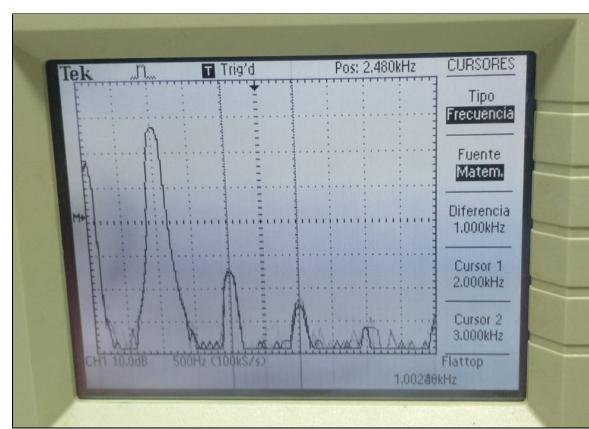


Figura 49: Máxima excusión simétrica a lazo abierto.

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 50.



(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 50: Análisis espectral del amplificador con señal de 1 kHz a lazo abierto.

En la Figura 51, se miden las amplitudes de la fundamental y sus dos primeros armónicos.

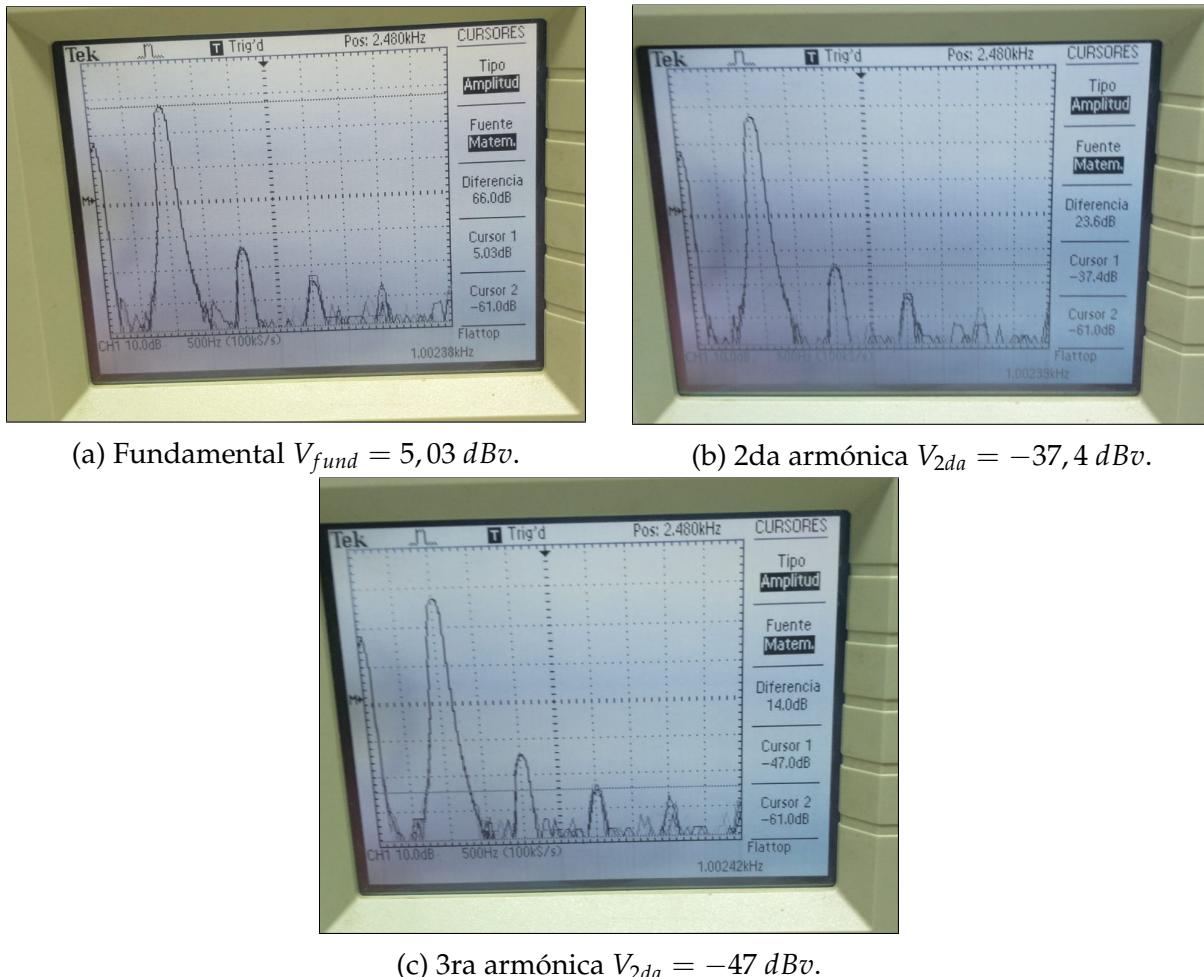


Figura 51: Amplitud de la fundamental y sus dos primeras armónicas a lazo abierto.

Ahora, se procede a hacer el mismo análisis a lazo cerrado. Para empezar, se restituye el nivel de la fundamental, y se ubican las frecuencias de la misma y sus dos primeros armónicos, ésto se enseña en la Figura 52.

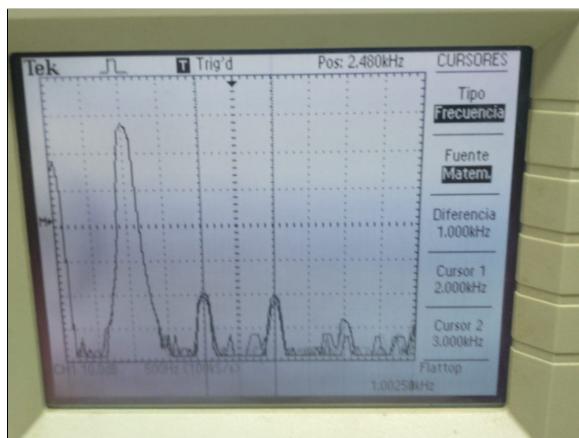
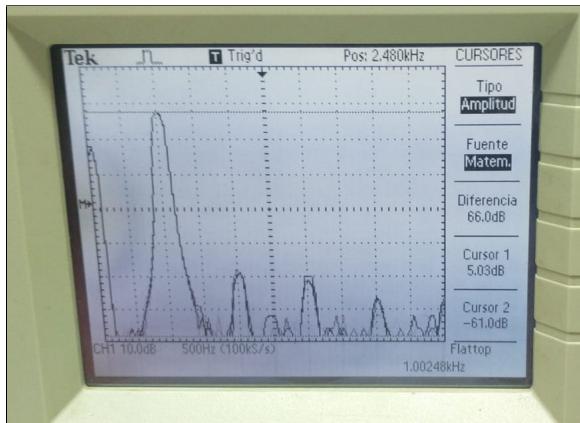


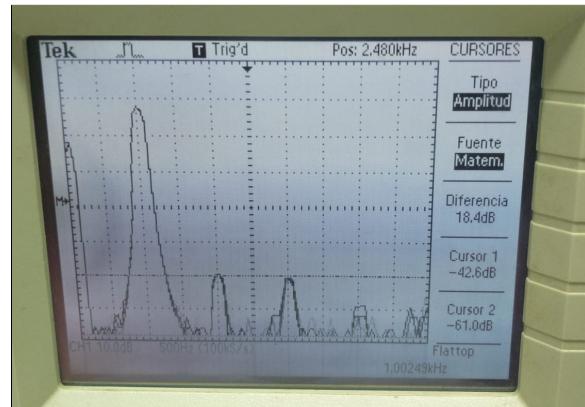
Figura 52: Frecuencia de armónicos a lazo cerrado.

Por consiguiente, se miden las amplitudes de los ya mencionados, como muestra la Figura 53. Para ello se coloca un cursor en el punto a medir, y éste valor es corres-

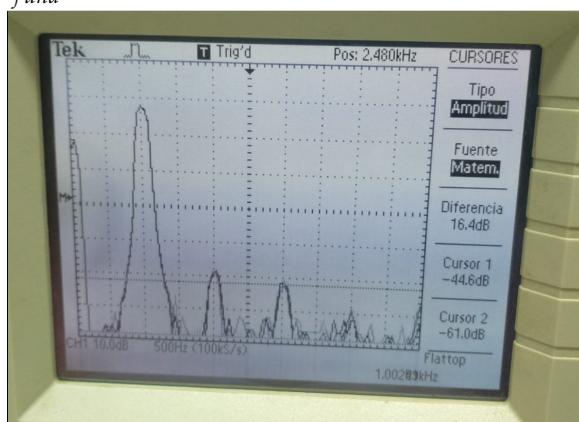
pondiente a la amplitud en dB referenciada a 1 [V_{rms}].



(a) Fundamental $V_{fund} = 66 \text{ dBv}$.



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



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

Figura 53: 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** (DA) en porcentaje, que se define como

$$DA \% = \frac{V_{arm}}{V_1} \cdot 100, \text{ con } V_{arm} = \sqrt{V_{2da}^2 + V_{3ra}^2}. \quad (4)$$

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

Es posible destacar una ventaja importante del análisis en frecuencia respecto al tiempo de determinadas señales, la cual se relaciona con la visualización del contenido armónico de las mismas, que no siempre está a la vista, principalmente cuando se está analizando señales con una cantidad considerable de superposición armónica (lo que dificulta el análisis en el dominio del tiempo), o también para develar el de una señal que aparenta no tener ésto último. En contraposición, una desventaja igual de considerable es la dificultad que presenta el análisis en frecuencia para determinar transitorios de corta duración.

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.