

Evaluación de la resolución frecuencial en osciloscopios comerciales

C. Stern Forgach y J.M. Alvarado Reyes

Departamento de Física, Facultad de Ciencias UNAM

Facultad de Ciencias, UNAM. Av. Universidad 3000, Circuito Exterior S/N

Delegación Coyoacán, C.P. 04510 Ciudad Universitaria, D.F. México.

e-mail: catalina@ciencias.unam.mx; jmar@ciencias.unam.mx

Received 18 January 2015; accepted 13 May 2015

Los osciloscopios tanto digitales como analógicos son instrumentos de medición imprescindibles en la enseñanza y en la investigación experimental, ya que tienen la capacidad de adquirir y representar señales en los espacios temporal y frecuencial. Generalmente, los manuales de uso describen detalladamente la base de tiempo y la capacidad de memoria, y le dan poca importancia a la relación entre el número de muestras y la frecuencia de muestreo. Estos parámetros afectan de manera importante a la resolución frecuencial en el análisis de Fourier. En este artículo se comparan varios osciloscopios respecto a la capacidad que le dan al usuario de variar el número de muestras y la frecuencia de muestreo y así determinar la resolución frecuencial de la señal adquirida y evitar la generación de archivos extensos e innecesarios. El análisis se realizó detectando, con varios osciloscopios y con bases de tiempos diferentes, una señal monocromática que oscila a una frecuencia específica. Los resultados de las adquisiciones, para el caso de una señal que oscila a 10 KHz, mostraron que utilizando el botón de auto, común en todos los osciloscopios digitales, se obtuvo un error en la frecuencia esperada de hasta un 50 % como máximo, siendo 0.9 % el error mínimo presentado por los osciloscopios que tienen la capacidad de variar tanto el número de muestras como la rapidez de adquisición.

Descriptor: Instrumentos de adquisición; espectros de frecuencia; resolución en frecuencia.

Digital and analogue oscilloscopes are necessary instruments in any teaching and research laboratory. Today's oscilloscopes can acquire signals and represent them in the time and frequency domains. User manuals describe well the time base and the storage capability, but they do not mention the important relationship between the number of data and the sampling frequency. These parameters are directly responsible of the frequency resolution that can be attained in a Fourier analysis. In this paper we compare various oscilloscopes with respect to the capacity they give the user to choose the number of data and the sampling frequency independently, and thus determine the frequency resolution, and avoid large unnecessary data files. The analysis was performed acquiring a mono chromatic signal with different oscilloscopes and different time basis. Results for a 10 KHz signal showed that when the auto button was used, there was up to a 50 % error in the expected frequency, while only a 0.9 % error was obtained with oscilloscopes that allow the user to choose independently the sampling frequency and the number of data.

Keywords: Instruments of acquisition; frequency spectrum; frequency resolution.

PACS: 0.1.50.Pa; 07.05.Hd; -43.60.-c

1. Introducción

1.1. Antecedentes

Los intentos de crear la imagen de una forma de onda datan de principio del siglo XIX. El primer método de la historia para crear una imagen de una forma de onda era a través de un minucioso y laborioso proceso de medición de la tensión o corriente de un rotor giratorio en puntos específicos alrededor del eje del rotor, y teniendo en cuenta que las mediciones efectuadas se realizaban con un galvanómetro [1]. La aparición de los tubos de rayos catódicos es la pauta para que Karl Feriando Braun inventara el primer osciloscopio en 1897 [2]; No es hasta el año 1946 cuando Tektronix comercializa el primer osciloscopio Modelo 511 [3]. Se trataba del primer osciloscopio analógico. Agilent crea en 1960 un nuevo diseño de osciloscopio, el primero en utilizar una nueva técnica de muestreo para ver las formas de onda digitales más rápidas utilizadas en tecnología informática. [4]. El primer osciloscopio digital, de uso general, lo construye LeCroy en 1985 [5]. Después de casi 30 años de la existencia del primer osciloscopio digital, poco se sabe de la resolución en frecuencia in-

trínseca en este tipo de instrumentos. Existen una gran variedad de osciloscopios digitales comerciales con características específicas respecto al ancho de banda, frecuencia de muestreo, bases de tiempo y capacidad de memoria, por lo que la óptima elección del osciloscopio debe considerar las ventajas y desventajas de cada uno de sus parámetros [6] Hoy en día los osciloscopios no sólo analizan las señales en el dominio temporal sino también en el dominio frecuencial. En su defecto, los datos temporales son guardados, por el usuario, en una tarjeta almacenadora de datos y posteriormente analizados empleando una computadora. Si bien hoy en día el avance de tecnología ha facilitado la adquisición y análisis de señales, también pone nuevos retos en el uso óptimo de estos instrumentos.

La tendencia del desarrollo tecnológico hace imprescindible el uso de instrumentos para la adquisición digital de señales analógicas. Una manera superficial de usar el osciloscopio es mediante el empleo de un botón llamado autosest. Este botón, como se muestra en el presente trabajo, puede proporcionar errores en la frecuencia de hasta en un 50 % según el osciloscopio utilizado.

1.2. Motivación

La base de tiempo (BT) es una perilla o botón en todos los osciloscopios, con la que el usuario puede modificar la escala temporal (eje horizontal). La resolución temporal es el intervalo de tiempo entre dos datos consecutivos. El inverso de la resolución temporal es la frecuencia de muestreo. Es común que los usuarios empleen esta perilla con la finalidad de obtener mayor resolución temporal, lo que les permite reconstruir adecuadamente una señal en el dominio del tiempo.

Otra manera de analizar las señales es en el dominio de las frecuencias, para lo cual se utiliza la Transformada de Fourier Discreta (DFT por sus siglas en inglés). El intervalo entre dos puntos consecutivos sobre el eje de las abscisas en el espacio de las frecuencias se llama resolución en frecuencia (Δf).

Los osciloscopios digitales basan su estructura de construcción y adquisición en un teorema fundamental, conocido en el área de procesamiento de señales, como el *Teorema de Nyquist* [7-9]. Este teorema es importante para determinar la velocidad de adquisición de una señal para que garantice la reconstrucción adecuada de la misma en el espacio temporal. El teorema de Nyquist es aplicable en cualquier instrumento de adquisición de señales. Con el objetivo aparente de evitar problemas, los fabricantes hacen un sobremuestreo en casi cualquier señal adquirida. Posteriormente utilizan un sin número de herramientas de procesamiento de señales para analizar la información en el dominio de las frecuencias.

La adquisición adecuada de una señal permite obtener una buena resolución en frecuencia y por lo tanto, optimizar su análisis. Permite, al igual que el ventaneo [10-12], la disminución del derrame espectral y el control del tamaño de los archivos de datos.

El derrame espectral es la aparición de frecuencias espurias al aplicar la DFT a una serie finita de datos que no contiene un número entero de ciclos. Cuando una de las frecuencias de la señal no cae dentro de uno de los múltiplos de Δf , la energía de la señal adquirida se distribuye entre todos los puntos alrededor de las componentes frecuenciales involucradas en la señal. La amplitud de las frecuencias espurias es en general menor que las frecuencias involucradas. La aparición del derrame espectral es inevitable, pero se puede disminuir al aplicar ventanas adecuadas durante el tratamiento de la señal. Una ventana es una porción de datos de la señal total. Existe una gran variedad de ventanas que permiten suavizar el paso entre el último punto de una porción con el primero de la siguiente. Por estar fuera del alcance de este trabajo se recomienda [12].

Un error común en el uso de un osciloscopio es no relacionar la frecuencia de muestreo con la resolución en frecuencia, antes de la adquisición de cualquier señal. Esta es la motivación principal de este trabajo.

2. Resultados

En muchas ocasiones, los datos que representan a una señal temporal, son adquiridos con un osciloscopio con un número

de datos y una velocidad de muestreo inamovibles determinados por el fabricante. Estos parámetros determinan la resolución en frecuencia, Δf , representada por la Ec. (1), donde f_s es la frecuencia de muestreo y N es el número de datos, parámetros intrínsecos en el archivo de datos de la señal adquirida.

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} \tag{1}$$

En la mayoría de los osciloscopios f_s varía según la base de tiempo (BT) utilizada, mientras que N es fijo; otros osciloscopios, los más caros, permiten seleccionar tanto el número de muestras como la frecuencia de muestreo deseado por el usuario. El control de estos últimos parámetros proporciona un cierto grado de independencia en el uso del botón BT.

En los resultados obtenidos en el presente trabajo, se emplearon 8 diferentes modelos de osciloscopios correspondientes a 4 marcas distintas. Con estos osciloscopios se adquirió una señal monocromática senoidal de 10 KHz y se evaluó la transformada de Fourier empleando una computadora. Las conclusiones presentadas en este trabajo son semejantes a los observados en frecuencias del orden de decenas o cientos de Hertz, en el intervalo de audio, con menor o mayor error. El objetivo de este trabajo no es la caracterización de los osciloscopios, sino el análisis del efecto de la adquisición de la señal en la resolución en frecuencia.

La adquisición de la señal se realizó de la siguiente manera: Primero, se procedió al uso del botón, denominado en la mayoría de los osciloscopios, como autoset. Una vez seleccionada esta opción se escogía la segunda base de tiempo adyacente a la autogenerada por dicho botón; que correspondió a 100 μs en la mayoría de los osciloscopios utilizados en este trabajo. La tercera base de tiempo seleccionada fue de 1 ms, bajo los argumentos de que una base de tiempo del orden de milisegundo generaría frecuencias de muestreo del orden de KHz. Aunque esta hipótesis no fue cierta, como se puede notar en la Tabla I, con dicha base de tiempo se obtuvieron los mejores resultados respecto a la frecuencia esperada.

Al evaluar la transformada de Fourier de las señales adquiridas, se obtuvieron los valores de los parámetros f_s y N y el tamaño del archivo registrados en la Tabla I.

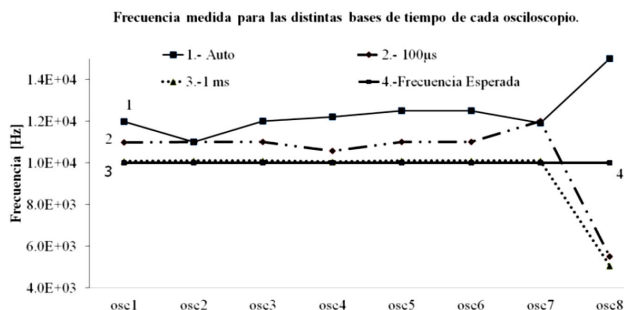


FIGURA 1. Frecuencias medidas en cada uno de los osciloscopios en sus distintas bases de tiempo. La línea 4 corresponde a la frecuencia esperada de 10 KHz la cual prácticamente coincide con la línea 3 correspondiente a la base de tiempo de 1 milisegundo.

TABLA I. Parámetros obtenidos de distintos osciloscopios al adquirir una misma señal con tres bases de tiempo distintas. Estos parámetros fueron obtenidos al evaluar la FFT de la señal adquirida.

	BT	f_s [MHz]	N [ks]	Bytes [MB]
OSC I	Auto	4000	2003639	51.2
	100 μ s	2000	2000	49.7
	1 ms	2000	2000	49.7
OSC II	Auto	1000	100	19.1
	100 μ s	125	125	2.89
	1 ms	125	1250	30.1
OSC III	Auto	5	2.5	0.046
	100 μ s	2.5	2.5	0.046
	1 ms	0.25	2.5	0.043
OSC IV	Auto	25	12.28	0.294
	100 μ s	5	12.28	0.294
	1 ms	0.5	12.28	0.294
OSC V	Auto	25	10	0.169
	100 μ s	10	10	0.169
	1 ms	1	10	0.172
OSC VI	Auto	12.5	5	0.162
	100 μ s	5	5	0.16
	1 ms	0.5	5	0.154
OSC VII	Auto	10	5	0.119
	100 μ s	5	5	0.119
	1 ms	0.5	5	0.112
OSC VIII	Auto	10	2	0.061
	100 μ s	1	2	0.062
	1 ms	0.1	2	0.062

La Fig. 1 presenta las frecuencias obtenidas para las distintas bases de tiempo de los diferentes osciloscopios. Cada línea representa una base de tiempo distinta. La línea 4 se graficó con fines de referencia, es decir, esta línea representa un valor constante de 10 KHz, por lo que de esta manera es posible tener una idea de cuánto se alejan los datos medidos del esperado.

El error porcentual en esta base de tiempo de 1ms fue del 1 % en casi todos los osciloscopios, con excepción del osciloscopio 8 en el que se obtuvo un error del 50 %. Para la base de tiempo generada al emplear el botón autose, se obtuvo un error porcentual mínimo del 10 % y un máximo del 50 %, este último corresponde al osciloscopio 8.

Es importante señalar que los errores tan grandes obtenidos en el osciloscopio 8 no se deben a un error de calibración. Todos los osciloscopios se calibraron inicialmente de acuerdo con las especificaciones y recomendaciones del fabricante respectivo. Aunque existe un error enorme en el osciloscopio 8, no es posible concluir que es uno de los peores. Primero porque no es el objetivo de este trabajo, y segundo porque

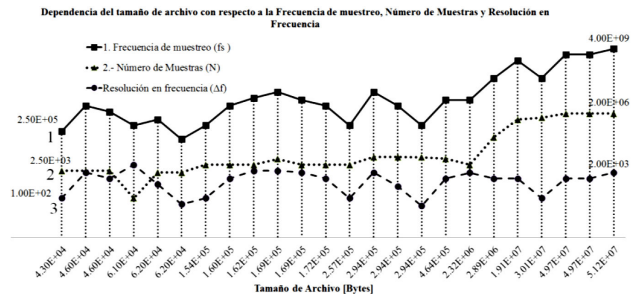


FIGURA 2. En el eje horizontal aparecen los tamaños de los 24 archivos obtenidos con los 8 osciloscopios al variar la base de tiempo; la curva 1 muestra la frecuencia de muestreo, la 2 el número de muestras y la 3 resolución frecuencia correspondientes.

con bases de tiempos 50 μ s y 500 μ s utilizadas en el osciloscopio 8, se obtuvieron errores porcentuales del 20 % y 2 % respectivamente.

La resolución en frecuencia Δf , se obtiene al realizar la transformada de Fourier de la señal adquirida. Considerar la Δf antes de adquirir una determinada señal puede disminuir la incertidumbre del error de la o las componentes involucradas en la señal. Además se optimiza el tamaño del archivo de datos considerablemente. El usuario siempre tiene control sobre la base de tiempo. En la mayoría de los osciloscopios, a partir de este valor, la frecuencia de muestreo y el número de muestras, y por lo mismo la resolución frecuencia quedan predeterminados. Es decir, el usuario, en la mayoría de los casos, no conoce dichos parámetros hasta el momento del análisis frecuencia. La Fig. 2 hace un análisis de las 24 señales adquiridas en este trabajo. En el eje de las abscisas aparece el tamaño de los archivos, la curva 1 muestra la frecuencia de muestreo, la 2 el número de muestras y la 3 la resolución en frecuencia; todos determinados por los diferentes osciloscopios. Por ejemplo, se obtuvo una resolución de 100 Hz con varios archivos desde 43 kB hasta 30.1 MB.

El tamaño de archivo más grande que se obtuvo es de 51.2 MB. Contiene 2 millones de datos adquiridos a una velo-

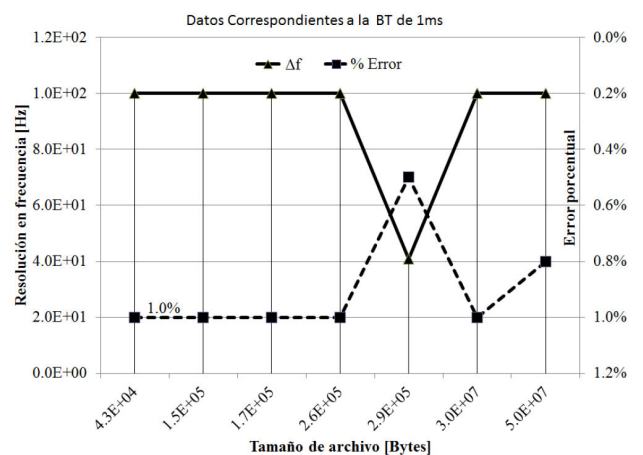


FIGURA 3. Se muestran los errores porcentuales de 7 osciloscopios con una misma BT de 1 ms. Es importante mencionar que con dicha BT se perdió resolución temporal pero se ganó resolución frecuencia y por consiguiente se obtuvo un menor error porcentual.

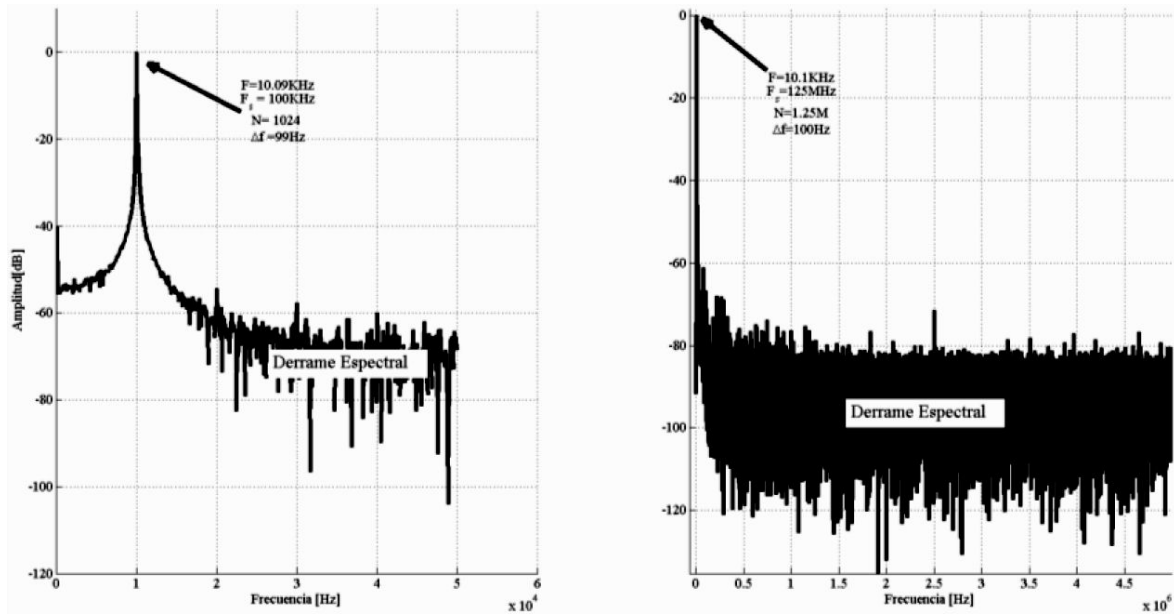


FIGURA 4. Frecuencia esperada 10 KHz. a) $N = 1024$ y $f_s = 100$ KHz Se obtiene la señal deseada sin archivos grandes y con poco derrame espectral. b) $N = 1.25 \times 10^6$ y $f_s = 125$ MHz. El derrame espectral aumenta con el número de muestras y la frecuencia de muestreo.

cidad de muestreo de 4000 MHz. Con estos parámetros se obtuvo una $\Delta f = 2$ KHz. Estos resultados corresponden a la base de tiempo de auto-set del primer osciloscopio. En estas condiciones se midió una frecuencia de 11.92 KHz, lo que equivale a un error porcentual aproximado del 20 %. Para valores de $\Delta f = 0.1$ KHz, se obtuvieron errores porcentuales de alrededor del 1 %.

La Fig. 3 muestra la resolución en frecuencia Δf obtenida con la misma base de tiempo de 1 ms en 7 osciloscopios (línea continua y eje de las ordenadas izquierdo), y su error porcentual (línea discontinua y eje de las ordenadas derecho). El osciloscopio 8 no se presentó en Fig. 3, porque en esa base de tiempo se tiene un error del 50 %, y dado los muy bajos errores porcentuales que se obtuvieron en los demás osciloscopios sería difícil observar las comparaciones entre ellos.

Un error porcentual de 1 % es, sin lugar a duda, una excelente aproximación en la adquisición de una señal. Este error se logró en la mayoría de los casos con $\Delta f = 0.1$ KHz. En la Fig. 3 se puede notar $\Delta f = 0.1$ KHz el archivo de datos mas pequeño es de 43 KB, y el más grande es de 30 MB. ¿Es posible obtener la misma Δf con un tamaño de archivo mas pequeño? La respuesta es afirmativa, pero con un instrumento que permitiera manipular los valores de f_s y N . Durante el desarrollo del presente trabajo se emplearon osciloscopios con dichas características. Al calcular Δf se obtiene

$$\Delta f = \frac{100 \text{ KHz}}{1024} = 97.6 \text{ Hz} \tag{2}$$

Para este valor de Δf se obtiene el espectro que se presenta en la Fig. 4. El error porcentual obtenido es de 0.9 %. Es interesante mencionar que se obtuvo la frecuencia esperada con pocas muestras y con una baja tasa de adquisición; y mejor aún, con un archivo de datos de 22 KB.

Es poco usual que los instrumentos empleados para adquirir señales permitan manipular los parámetros f_s y N ; y si lo hacen, por lo general son muy caros. De los osciloscopios empleados durante este trabajo sólo dos de ellos permitían el control de dichos parámetros. Al menos, se debería de evaluar Δf después de adquirida la señal lo que ayudaría a entender mejor los resultados espectrales de la señal adquirida.

3. Conclusiones

Es posible optimizar Δf mediante la variación de f_s o N . En otras palabras; es posible tener la misma Δf sin necesidad de altas f_s y valores de N excesivos, y como consecuencia, se puede obtener un bajo derrame espectral y un tamaño de archivo pequeño.

Los resultados obtenidos en este trabajo no pretenden ser una alerta en el manejo de osciloscopios o tarjetas adquisidoras de datos. Se pretende exponer la importancia de evaluar la resolución en frecuencia, Δf , antes de adquirir cualquier señal; con lo cual será posible predecir las limitaciones y alcances del instrumento o tarjeta adquisidora de datos empleada en un determinado experimento.

El sobremuestreo o el exceso de muestras no sólo nos proporcionan un intervalo de observación innecesario o un exceso de derrame espectral, también crea archivos grandes de datos que son difíciles de manejar en una computadora.

Agradecimientos

A DGAPA-UNAM a través del proyecto PAPIIT IN117712 “Propagación de ondas a través de interfaces”. También al Proyecto CONACyT-CB-112092 por el préstamo de equipo.

1. J. Pedraos, *Osciloscopio Historia de este instrumento, origen, importancia, por qué y para qué se utiliza* <http://bogotasiempreazul.blogspot.mx/2010/08/osciloscopio-historia-el-primer-metodo.html>. (2010)
2. Kurylo, Friedrich, Ch. Suskind, F. Braun, "A Life of the Nobel Prizewinner and Inventor of the Cathode-Ray Oscilloscope"; Published by MIT Press, Cambridge, MA, (1981)
3. History Tektronix <http://tekmuseum.ebaman.com/main.html>
4. History Agilent <http://www.agilent.com/about/companyinfo/history/>
5. History LeCroy <http://www.fundinguniverse.com/company-histories/lecroy-corporation-history/>
6. Alan Tong Technical Director, Pico Technology, *What to Look for When Choosing an Oscilloscope*, http://www.picotech.com/applications/oscilloscope_tutorial.html
7. Lyons Richard, *Understanding Digital Signal Processing*, (2nd Edition, Eddison Wesley, 1997) pp. 23-29
8. Oppenheim, V. Alan: *Discrete-time signal processing*, (Prentice Hall, 1999) 146.
9. G. Proakis John, D.G. Manolakis, *Digital Signal Processing. Principles, Algorithms and Applications* (Prentice Hall, 3a edición, 1998) 273-274
10. W.J. Riley, *Properties of FFT Windows Used in Stable32, Hamilton Technical Services*; (2007): [http://www.wriley.com/Properties of FFT Windows Used in Stable32.pdf](http://www.wriley.com/Properties%20of%20FFT%20Windows%20Used%20in%20Stable32.pdf)
11. F. Harris, *Proceedings of the IEEE* **66** (1978) 51.
12. S. Rapuano, F.J. Harris, *IEEE Journals* **10** (2007) 32