

Análisis de la respuesta de los sistemas lineales mediante diversas técnicas, incluyendo el análisis de Fourier para un filtro pasabajas de primer orden

Jesús María Llanos Ávila

Facultad de Ingeniería Electrónica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia
jllanosa@gmail.com

Resumen— En este trabajo se analiza el comportamiento de un filtro pasabajas pasivo de primer orden, mediante diferentes técnicas como son: el análisis de la función de transferencia en forma matemática, análisis experimental en laboratorio, simulación mediante programas de software de circuitos. Además se examina la respuesta del filtro a una entrada de ruido blanco, y por último se utiliza el método del análisis de Fourier para relacionar la señal de entrada y la salida del mismo filtro. Adicionalmente se estudia la serie de Fourier para reconstrucción de una señal periódica partiendo de sus armónicos para verificar el comportamiento de las fases de los armónicos y sus respectivas amplitudes al pasar por el mismo filtro con el fin de generalizar la respuesta del sistema a cualquier señal de entrada periódica a la cual se le conoce su serie de Fourier.

Palabras Clave— función de transferencia, sistemas lineales, serie de Fourier, espectro, ruido blanco, distorsión, filtros pasivos.

Recibido: 7 de marzo del 2021. Revisado: 15 de abril del 2021. Aceptado: 30 julio de 2021.

Analysis of the response of linear systems using various techniques, including Fourier analysis

Abstract— This paper introduces the behavior of a first-order passive low-pass filter is analyzed using the analysis of the transfer function in a mathematical way, experimental analysis in the laboratory, simulation using circuit software programs. In addition, the response of the filter to a white noise input is examined, and finally the Fourier analysis method is used to relate the input signal and the output of the same filter. Additionally, the Fourier series is studied to reconstruct a periodic signal starting from its harmonics to verify the behavior of the phases of the harmonics and their respective amplitudes when passing through the same filter in order to generalize the response of the system to any signal of periodic entry to which its Fourier series is known.

Keywords— *Fourier series, distortion, wave form, lineal systems, passive filters.*

1 Introducción

Por medio del análisis de Fourier se pueden estudiar distintas señales periódicas [1] a partir de sus componentes armónicas, dicho análisis es fundamental al estudiar el efecto de un sistema lineal sobre una señal. Es importante conocer como distintos sistemas tales como los filtros pueden alterar una señal produciendo distorsión por fase o por amplitud [2]. El objetivo de la investigación fue identificar los efectos de la distorsión en una señal al pasar por un sistema lineal, analizando para ello un filtro pasa-bajas de primer orden [3], [4] y encontrar los parámetros que son afectados en la señal y que son producidos

por el sistema. Cabe anotar que el orden de un sistema está determinado por el grado de su polinomio característico, esto es, por el número de polos que tiene el sistema en su conjunto en el dominio de la frecuencia [3], [4], [5], [6], [7].

La serie de Fourier es una herramienta matemática con la cual podemos estudiar distintos tipos de señales. La mayoría de formas de onda no senoidales periódicas se pueden expresar como la suma de componentes senoidales, cada una con distinta frecuencia, amplitud y desplazamiento de fase [8].

La serie de Fourier es un instrumento con el cual se pueden determinar las componentes armónicas y la amplitud de cada uno de estos elementos que conforman la señal [1].

Cuando se trabajan señales y sistemas existen factores que pueden alterar la fase y la amplitud de las componentes armónicas de dicha señal produciendo distorsión. Uno de estos sistemas son los filtros, los cuales producen atenuaciones y corrimientos de fase no lineales.

La distorsión es un efecto por el cual una señal se modifica alterando su forma de onda [2], [9]. Esto es un serio problema cuando se trabajan señales biológicas ya que están constituidas por múltiples armónicas y lo que se quiere en ciertas ocasiones es mostrar la señal tal cual como se produce una vez tratada adecuadamente [9]. Existe el concepto de transmisión sin distorsión o teorema de desplazamiento en el tiempo que nos explica cómo se puede tratar una señal sin distorsionarla [10].

2 Marco teórico

Para el desarrollo de las simulaciones fueron aplicadas herramientas como MATLAB y NI Multisim (software de que originalmente fue creado por Electronics Workbench Group y que ahora es una división de National Instruments), estas herramientas permiten hacer un análisis de señales y de la serie de Fourier [11].

2.1 Serie de Fourier

Una serie de Fourier es una suma de sinusoides armónicamente relacionadas, cada senoide con su propia amplitud y fase, conformando una serie infinita, que en muchos casos puede ser finita, la cual converge puntualmente a una función continua y periódica [2].

La herramienta matemática básica del análisis de Fourier se emplea para analizar funciones periódicas a través de la descomposición de dicha función en una suma infinitesimal de funciones senoidales más simples. Prácticamente suelen ser suficientes un número finito de componentes o términos para conseguir una aproximación razonable a la onda no senoidal deseada.

Según [8], la serie de Fourier se expresa matemáticamente por de la forma (1), donde el periodo es (2).

$$f(t) = \frac{c_0}{2} + \sum_{k=1}^{k=\infty} (c_k \cos(k\omega_0 t + \theta_k)) \quad (1)$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} \quad (2)$$

El término constante de forma $C_0/2$ es el término medio (o valor medio o promedio) de la función $f(t)$. La suma de componentes relacionadas armónicamente proporciona una resultante periódica de igual periodo a la fundamental si cumple que m y n sean enteros y la ecuación (3).

$$f(t) = b_1 \text{sen}(\omega_0 t) + b_n \text{sen}(n\omega_0 t) + b_m \text{sen}(m\omega_0 t) \quad (3)$$

Para comprobar que: $f(t) = f(t + 2\pi/\omega_0)$, se sustituye la primera función de la siguiente manera:

$$f\left(t + \frac{2\pi}{\omega_0}\right) = b_1 \text{sen}(\omega_0 t + 2\pi) + b_n \text{sen}(n\omega_0 t + 2\pi n) + b_m \text{sen}(m\omega_0 t + 2\pi m) \quad (4)$$

Puesto que al sumar múltiplos enteros de 2π a los argumentos de la función trigonométrica ésta no varía y la igualdad se cumple incluso para $b_1 = 0$. Serie de Fourier para una señal cuadrada es:

$$f(x) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=\text{impar}}^{\infty} \frac{1}{n} \text{sen}(xn) \quad (5)$$

2.2 Filtros pasivos. Respuesta en amplitud y fase en función de la frecuencia

Los filtros son circuitos que permiten el paso de una determinada banda de frecuencias mientras atenúan todas las frecuencias que no estén comprendidas dentro de esta banda [9], [11], [12]. Los filtros pasivos están conformados por componentes eléctricos que no producen amplificación como resistencias condensadores y bobinas. Estos filtros tienen un comportamiento no lineal en amplitud y en fase en el dominio de la frecuencia lo cual genera distorsión ante una señal de entrada determinada [1]. Este efecto se puede determinar claramente en señales de una sola componente armónica (señal seno pura).

La frecuencia de corte de un filtro pasa-bajas de primer orden está dada por la ecuación (6).

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (6)$$

La función de transferencia del filtro pasabajas se representa con la ecuación 7.

$$H(j\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} \angle \tan^{-1} \omega RC \quad (7)$$

La función de transferencia del filtro pasa-altas es:

$$H(j\omega) = \frac{\omega RC}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} \angle 90 - \tan^{-1} \omega RC \quad (8)$$

2.3 Distorsión

La distorsión es un efecto por el cual una señal se modifica alterando sus componentes armónicas, con lo cual se obtiene una señal distinta a la original [2], [5]. Si se analiza una señal seno pura en el dominio del tiempo, y esta a su vez pasa por un sistema, si esta onda se degenera de una onda senoidal pura a una deformada (una vez pase por un sistema), la expresión matemática se transforma de una expresión senoidal en una onda de Fourier de varias componentes armónicas; cuanto mayor es la distorsión, mayor será la cantidad de componentes de la onda de Fourier resultante [10], [13]. Igualmente se puede producir distorsión en señales que contienen varias componentes armónicas (onda cuadrada por ejemplo), si a la expresión matemática de serie de Fourier de una señal con múltiples componentes armónicas se le realiza corrimientos en fase o amplitud, la señal resultante es una señal distinta y por ende está distorsionada.

Existen sistemas que modifican tanto la amplitud como la fase de una señal. Un ejemplo son los filtros los cuales distorsionan por amplitud las componentes de la señal que están fuera de su banda de trabajo (distorsión por amplitud armónica), igualmente también pueden producir un corrimiento de fase a las componentes cercanas a la frecuencia de corte (esta es la llamada distorsión por fase).

2.4 Transmisión sin distorsión

Si algunas componentes armónicas se retrasan en el tiempo, se encontrará un desfase de dichas armónicas, lo cual produce distorsión y se observará que la señal de salida no corresponde a la función original. Para evitar distorsión por el desplazamiento se tiene el teorema de desplazamiento en el tiempo, el cual dice que el desfase introducido en cada una de las armónicas de la función debe ser proporcional al número del armónico del término correspondiente [2], [5]. Se dice que si dos funciones tienen armónicos de igual amplitud, y el desfase entre los armónicos correspondientes es proporcional al número del armónico, así las dos funciones van a tener la misma forma de onda, aunque tendrían un desplazamiento en el tiempo, lo cual constituye una herramienta importante a la hora de capturar señales biológicas sin tener problemas de distorsión y malas interpretaciones de diagnóstico.

Si una función $f(t)$ se retrasa en el tiempo t_1 , en la serie de Fourier habrá que sustituir t por $(t - t_1)$, esto es,

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \alpha_k e^{jk\omega_0 t} \quad (9)$$

Se convierte en (10):

$$f(t - t_1) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} (\alpha_k e^{-jk\omega_o t}) e^{jk\omega_o t} \quad (10)$$

Dónde α_k se expresa con la ecuación (11).

$$\alpha_k(\text{funcion retrasada}) = \alpha_k(\text{funcion original}) \times (e^{-jk\omega_o t_1}) \quad (11).$$

Un desplazamiento o retraso de t_1 segundos no produce ninguna variación de la magnitud de los coeficientes, pero si un desplazamiento de fase de $-k\omega_o t_1$ radianes en los coeficientes $\alpha_k t_1$ teniendo así la función, la misma onda pero desplazada en el tiempo.

3 Metodología

Para la revisión del análisis de Fourier del efecto del filtrado en señales con varias componentes armónicas se empleó la herramienta de simulación MATLAB utilizando algoritmos de graficación de las señales a estudiar. Inicialmente se estudia la serie de Fourier con una señal cuadrada, se realiza la reconstrucción de la señal cuadrada a través de la suma de sus componentes armónicas. Posteriormente se modifica el algoritmo de dicha serie añadiendo desplazamientos en fase y atenuaciones a cada una de sus componentes armónicas representando así distorsiones por fase y amplitud y se compara el efecto de la distorsión en forma gráfica. Para mayor practicidad en esta representación de distorsión solo se utilizan las primeras cinco componentes armónicas a las cuales se la añadieron dichos cambios en fase y amplitud. Por último se realiza el teorema de desplazamiento en el tiempo y se muestra cómo se puede trabajar señales sin distorsionarlas.

En el caso de los filtros pasivos se realizaron pruebas en laboratorio, simulaciones en NI Multisim 10 y análisis matemáticos para determinar la respuesta de un filtro pasivo de primer orden pasabajas en función de la frecuencia. Para los análisis se utilizó una resistencia de 10 K Ω un condensador de 10nF y un generador de señal senoidal con frecuencia variable.

4 Resultados

4.1 Reconstrucción de la señal cuadrada a través de la suma de sus componentes armónicas.

En las figuras 1 a 7 se muestra la reconstrucción de la señal cuadrada a través de una simulación hecha en MATLAB.

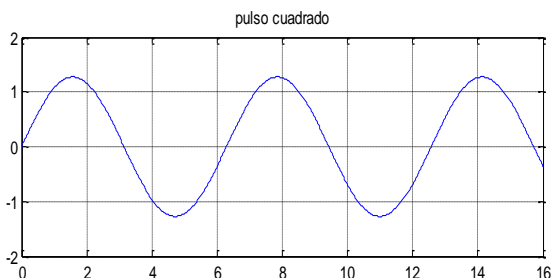


Figura 1. Primer armónico.
Fuente: El autor.

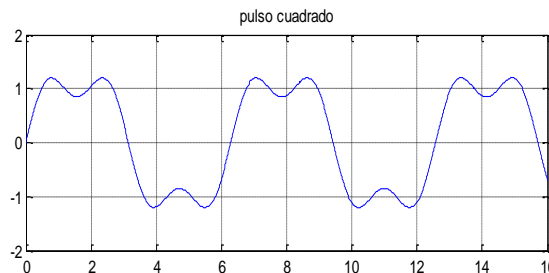


Figura 2. Sumatoria 2º Armónico.
Fuente: El autor.

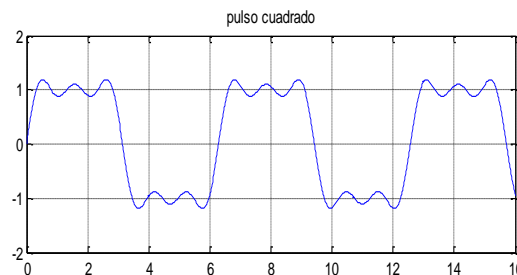


Figura 3. Sumatoria 3º Armónico.
Fuente: El autor.

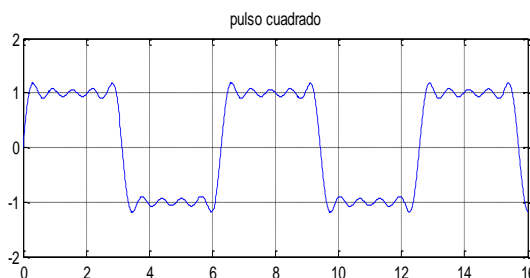


Figura 4. Sumatoria 5º Armónico.
Fuente: El autor.

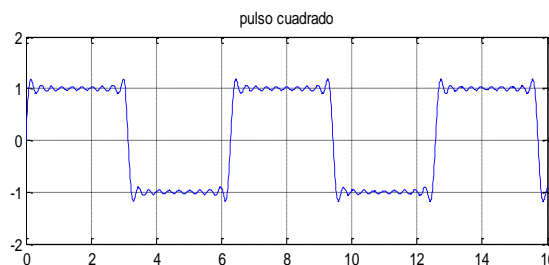


Figura 5. Sumatoria 10º Armónico.
Fuente: El autor.

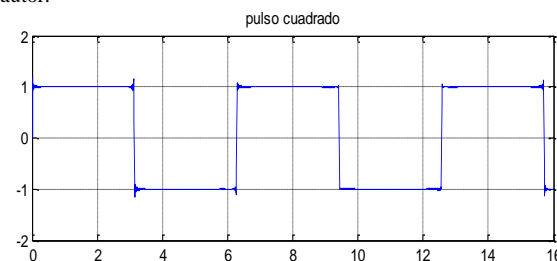


Figura 6. Sumatoria 100º Armónico.
Fuente: El autor.

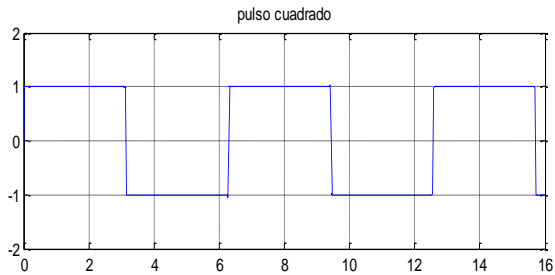


Figura 7. Sumatoria 1000^o Armónico.
Fuente: El autor.

4.2 Análisis del filtro pasivo pasa-bajas. (Amplitud y fase en función de la frecuencia).

Para el análisis del sistema se utilizan valores de R y C de tal forma que la frecuencia de corte es 1591 Hz. Las figuras 8 y 9 muestran una comparación de los resultados teóricos, prácticos y de simulación del efecto de un filtro pasivo pasa-bajas sobre una señal *seno*. (Amplitud y fase en función de la frecuencia).

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = 1591\text{Hz} \quad (12)$$

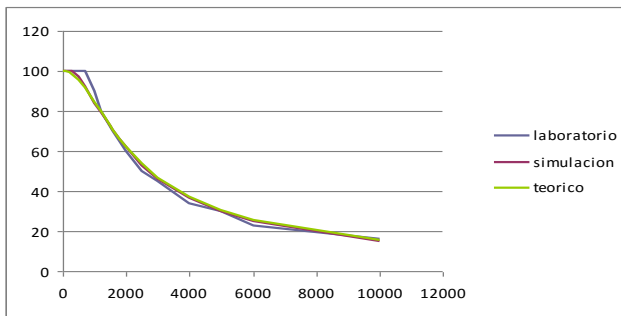


Figura 8. Respuesta de un filtro pasa-bajas pasivo de primer orden: Amplitud en función de la frecuencia.
Fuente: El autor.

La respuesta de un filtro pasa-bajas pasivo de primer orden se muestra en la Fig. 9: Amplitud en función de la frecuencia.

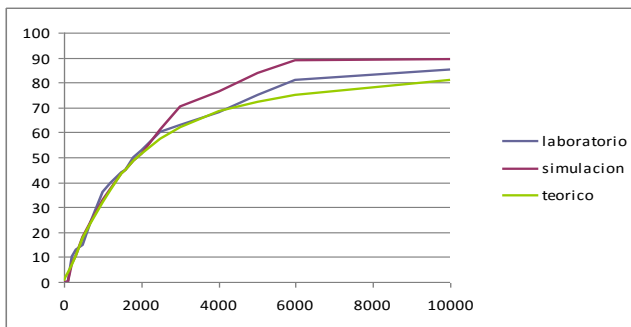


Figura 9. Respuesta de un filtro pasa-bajas pasivo de primer orden: fase en función de la frecuencia.
Fuente: El autor.

4.3 Simulación del filtro pasivo pasa-bajas

Las figuras 10 a 14 muestran la simulación realizada en NI Multisim 10 de un filtro pasivo pasabajas de primer orden.

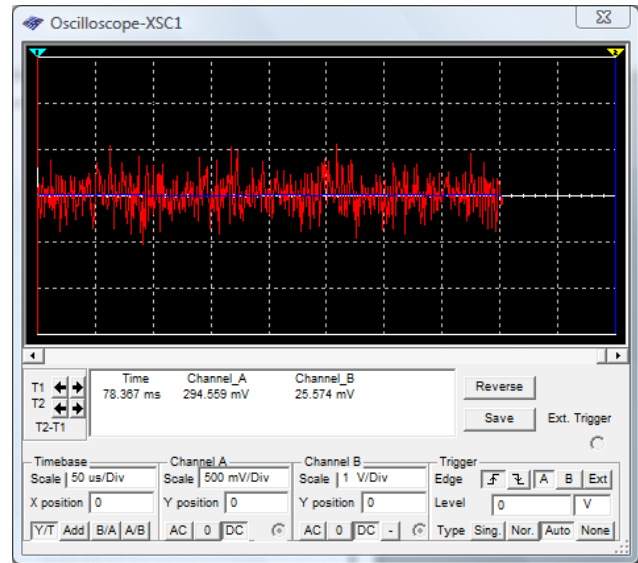


Figura 10. Señal de entrada: Ruido blanco (dominio del tiempo).
Fuente: El autor.

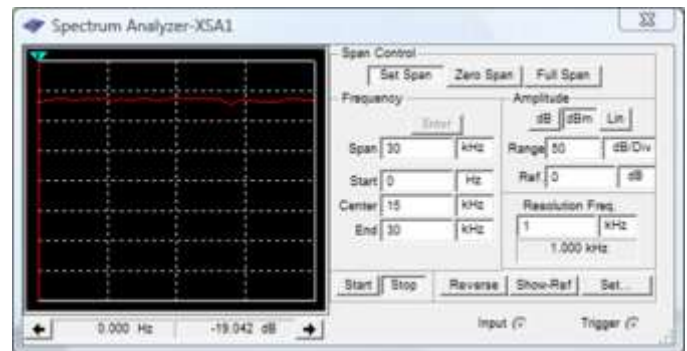


Figura 11. Espectro de la señal de entrada: ruido blanco.
Fuente: El autor.

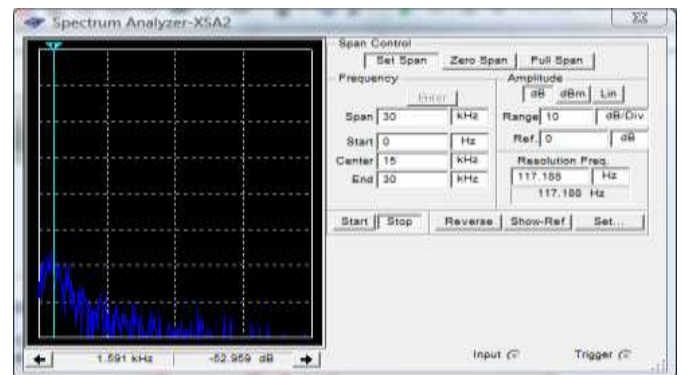


Figura 12. Espectro de la señal a la salida del filtro.
Fuente: El autor.

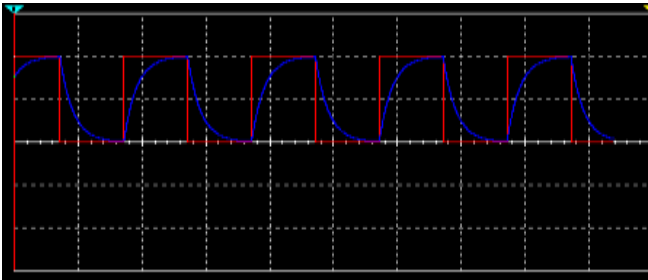


Figura 13. Señal de entrada y de salida: onda cuadrada.
Fuente: El autor.

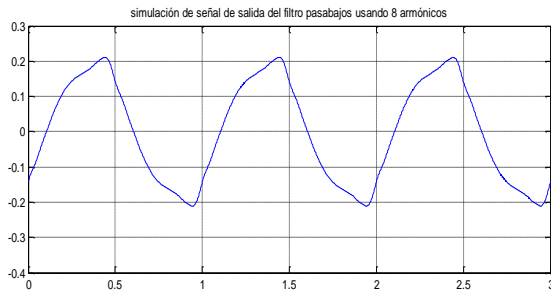


Figura 14. Reconstrucción de la señal de salida en MATLAB usando 8 armónicos.
Fuente: El autor.

4.4 Análisis de desplazamiento en fase de las componentes armónicas de la señal cuadrada.

Los siguientes gráficos muestran una simulación realizada en MATLAB donde se muestra el efecto de la distorsión por fase y amplitud sobre una señal cuadrada construida con 5 armónicos.

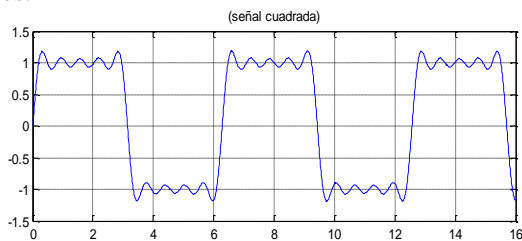


Figura 15. Sumatoria hasta el armónico 5 de la señal cuadrada.
Fuente: El autor.

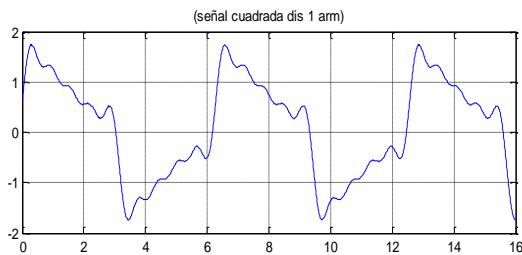


Figura 16. Desplazamiento de la fase del 1º armónico.
Fuente: El autor.

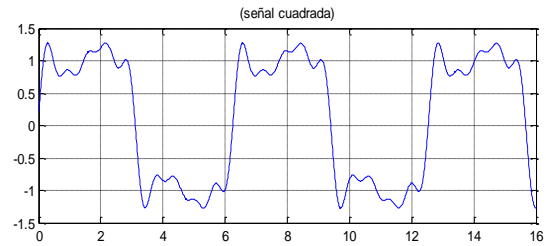


Figura 17. Desplazamiento de la fase del 2º armónico.
Fuente: El autor.

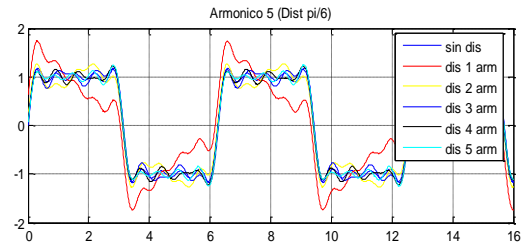


Figura 18. Superposición de las señales con desplazamiento de cada uno de sus armónicos.
Fuente: El autor.

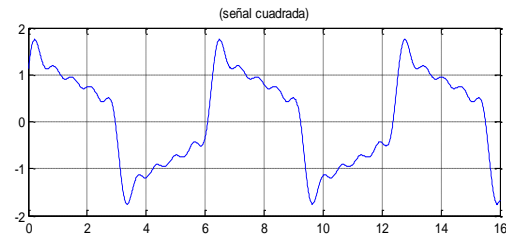


Figura 19. Desplazamiento de fase de igual magnitud para todos sus componentes armónicos.
Fuente: El autor.

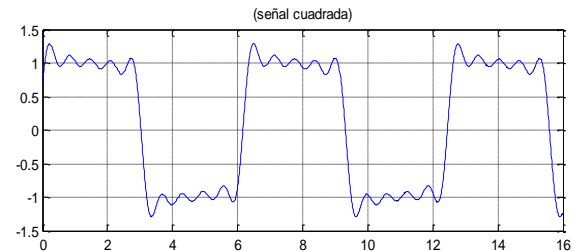


Figura 20. Desplazamiento de fase de magnitud lineal para todos sus componentes armónicos.
Fuente: El autor.

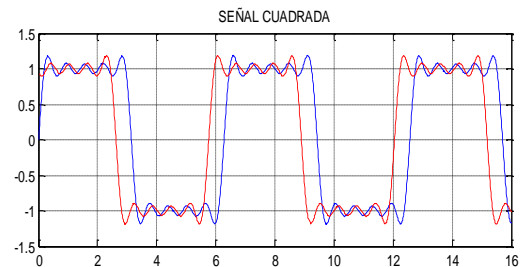


Figura 21. Desplazamiento de fase de magnitud lineal impar para todos sus componentes armónicos.
Fuente: El autor.

4.5 Análisis de atenuación de las componentes armónicas de la señal cuadrada

En las figuras 22 a 24 se representa el análisis de atenuación de las componentes para la señal cuadrada.

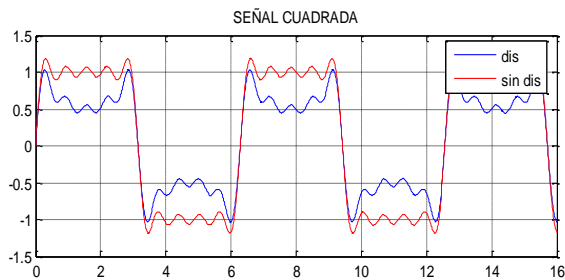


Figura 22. Atenuación de 3/5 de la amplitud del 1º armónico.
Fuente: El autor.

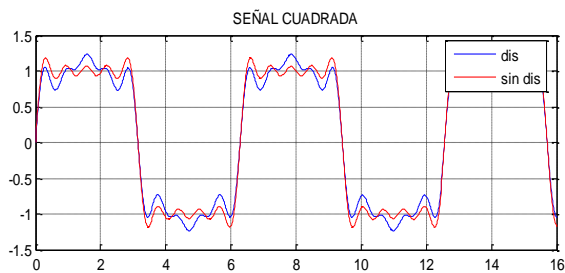


Figura 23. Atenuación de 3/5 de la amplitud del 2º armónico.
Fuente: El autor.

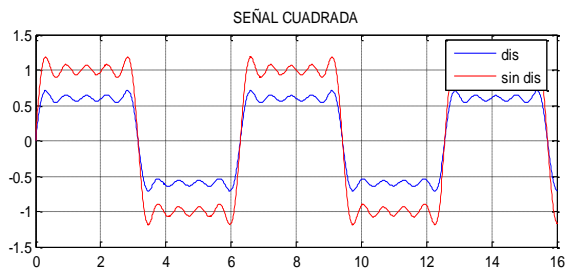


Figura 24. Atenuación de 3/5 de la amplitud de todos sus componentes armónicos.
Fuente: El autor.

5 Discusión

Todas las señales periódicas se pueden formar con una suma infinita de sus componentes armónicas seno o coseno. Sin embargo al observar los gráficos sobre reconstrucción de la señal cuadrada a través de la suma de sus componentes armónicas (figuras 1 al 7) se puede deducir que no hace falta una suma infinita para construir una señal en forma aceptable. Una señal cuadrada puede conformarse con la suma de aproximadamente 100 armónicos (Fig. 6).

Se puede observar en la reconstrucción de la señal cuadrada un fenómeno denominado fenómeno de Gibbs [14], el cual se presenta cuando la señal cambia abruptamente. Este solo desaparece cuando la serie tiende a infinito.

La Fig. 8, muestra el comportamiento de una señal seno a la salida de un filtro pasivo de primer orden la cual se ha obtenido mediante un barrido frecuencial. Se puede observar que la señal

es atenuada en el rango de frecuencias distinto al ancho de banda de trabajo; se atenúan las frecuencias superiores a la frecuencia de corte (f_c) para el filtro pasa bajas. Sin embargo la atenuación no es total a partir de la frecuencia de corte, si no que presenta una curva característica que comienza a una frecuencia inferior de f_c . Se puede observar que este comportamiento no es lineal, lo que denota una distorsión por alinealidad teórica. Si se observa la figura que describe el comportamiento de la fase (Fig. 9), también se concluye que la fase varía drásticamente y empieza mucho antes que f_c . El comportamiento que presenta la fase es una función arcotangente según la ecuación de función de transferencia analítica para el filtro, denotando así que la fase no es lineal, lo cual evidencia la distorsión por fase.

Los filtros pasivos presentan comportamientos no lineales en amplitud y fase según la observación analítica en los tres casos (teórico, experimental y simulación). Se presentan distorsiones por amplitud en las componentes de frecuencias de la banda de trabajo cercanos a la frecuencia de corte, dado que la atenuación comienza antes de la frecuencia de corte f_c y además no lo hace en forma lineal como lo debería realizar para cumplir con las condiciones teóricas. Al igual se presenta distorsión por fase de cada armónico debido a que la fase varía en gran parte dentro de la banda de trabajo y tampoco cumple con la relación lineal teórica para transmisión sin distorsión (figuras 8 y 9).

Las figuras 11 y 12 muestran el espectro de una señal de ruido blanco. Se observa que el espectro de la señal de ruido blanco (Fig. 11) abarca todo el espectro de frecuencia. Al pasar por el filtro (Fig. 12), se observa que las componentes de frecuencia mayores a f_c son atenuadas. La Fig. 13 muestra una señal cuadrada a la entrada del filtro, superponiendo la respuesta en el tiempo del mismo a esta entrada. La Fig. 14 muestra la reconstrucción en MATLAB hasta el 12º armónico de la señal cuadrada a la salida del filtro. Se puede ver el comportamiento exponencial creciente y decreciente en cada semi ciclo el cual es similar a la salida del filtro en la Fig. 13.

Como se puede observar en las figuras 14, 15, 16,17 y 18 un mínimo corrimiento en fase de un solo armónico logra distorsionar la señal, y este punto es de especial interés para el análisis de filtros dado que, como se dijo antes, los filtros introducen desplazamientos por fase dentro de la banda de frecuencias de trabajo. Para lograr un corrimiento de la señal sin presentar distorsión, se deben introducir desfases en cada uno de sus armónicos pero de forma lineal (Fig. 21) y no desplazamientos de igual magnitud dado que esto no corrige la distorsión si no que presenta una distorsión mayor (Fig. 19). La Fig. 21 muestra un desplazamiento en fase sin distorsión de la señal.

En la figura 22 y 23 se indica la distorsión que se presenta en una señal cuando sus componentes armónicas son atenuadas en algunos porcentajes de cada amplitud de sus armónicos.

En la señal cuadrada, dado que su serie es n impar, la linealidad del desplazamiento de su fase debe ser también impar. Como se observa en la Fig. 24 la señal no se distorsiona dado que los coeficientes de cada componente fueron multiplicados por una constante. La distorsión de mayor magnitud se presenta al desfasear el primer armónico (Fig. 22).

Dado que la fase de un filtro pasabajas de primer orden tiene un comportamiento de arcotangente, para minimizar la distorsión producida por esta función, se debe diseñar el mismo dentro de la región lineal o aproximadamente lineal de la función arcotangente en forma aproximada.

6 Conclusiones

El análisis de Fourier es una herramienta matemática potente para la descripción y el estudio de señales en el dominio del tiempo, por medio de ella se puede comprender todas las características que posee una señal dado que describe como un fenómeno físico construido por múltiples componentes armónicos que sumados representa una única forma de onda. Cuando se manejan sistemas de instrumentación, como los sistemas de filtraje, las componentes armónicas de dicha señal pueden cambiar dado que alteran la magnitud y la fase de dicha señal, generando así distorsión y por ende la consecución de una señal distinta a la original.

Tanto el análisis teórico y experimental, como la simulación, mostraron los efectos de los sistemas lineales sobre señales de múltiples armónicas. La utilización de filtros pasivos no es la mejor opción de filtraje si se quiere mantener una señal sin distorsión, para ello existen otros tipos de tratamiento de señal, de forma discreta, capaces de mantener la señal original sin variaciones.

Este tipo de estudios y análisis resultan de vital importancia no sólo desde el punto de vista académico, sino que además, enfoca al ingeniero de diseño a tener en cuenta las diversas metodologías que permiten llegar a soluciones de problemas prácticos en cuanto a sistemas de comunicación, audio profesional y demás aplicaciones que requieren dicho estudio.

Referencias

- [1] J. Medina, «Análisis de Fourier para el tratamiento de señales,» de *Proc. XII Encuentro de Matemáticas y sus aplicaciones*, Quito, 2010.
- [2] S. Olmos Herrera, «Estudio y análisis de circuitos analógicos de equalización y distorsión de señal de audio,» Valencia, 2020.
- [3] A. G. Radwan, A. M. Soliman y A. S. Elwakil, «First-order filters generalized to the fractional domain,» *Journal of Circuits, Systems and Computers*, vol. 170, n° 1, pp. 55-66, 2008.
- [4] R. E. Scott, *Linear Circuits*, California: Addison –Wesley, 1960, pp. 90-295,483-494,594-623.
- [5] F. Campana Valderrama y M. Márquez Marrou, «Análisis y diseño de un OTA CMOS y su aplicación en filtros de primer y segundo orden,» *Perfiles de Ingeniería*, vol. 1, n° 10, pp. 29-35, 2010.
- [6] J. R. Cogdell, F. J. R. Ramírez y C. P. Treviño, *Fundamentos de electrónica*, 43-45 ed., Pearson Educación, 2000.
- [7] C. K. Alexander y M. N. Sadiku, *Fundamentos de circuitos eléctricos*, McGraw-hill Education, 2013, pp. 253,376,637-641,726.
- [8] H. Hsu, *Análisis de Fourier*, Addison Wesley Iberoamericana S.A, 1987.
- [9] E. M. Cirugeda Roldán, «Medidas de entropía en el procesamiento de señales biológicas: robustez y caracterización frente a pérdida

de muestras y longitud de los registros (Doctoral dissertation, Editorial Universitat Politècnica de València),» 2014.

- [10] M. Nakazawa y T. Hirooka, «Distortion-free optical transmission using time-domain optical Fourier transformation and transform-limited optical pulses,» *Journal of the Optical Society of America B*, vol. 22, n° 9, pp. 1842-1855, 2005.
- [11] A. E. Leiva Esteban, «Diseño y simulación de un filtro activo de potencia para mitigar señales armónicas de corriente en una red de distribución de 2 kVA,» 2021.
- [12] R. F. Coughlin y F. F. Driscoll, *Amplificadores operacionales y circuitos lineales*, Prentice Hall, 1998, pp. 297-299.
- [13] J. R. Villaseñor Gómez, *Circuitos eléctricos y electrónicos. Fundamentos y técnicas para su análisis*, México : Prentice Hall, 2011.
- [14] J. E. Chirinos Rodríguez, «Series de Fourier,» Tenerife, 2019.

J. M. Llanos Ávila. Ingeniero Electrónico egresado Universidad Distrital Francisco José de Caldas, con experiencia en la industria a nivel de control y automatización, y en área de la docencia universitaria por más de 20 años. Sus áreas de interés son la electrónica aplicada, el control y la instrumentación avanzada. Es especialista en Bioingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, con estudios de maestría en Ingeniería Biomédica en la Universidad Nacional de Entre Ríos, Argentina. Actualmente es ingeniero de diseño en áreas de la bioingeniería, ingeniería biomédica, sistemas de potencia, sistemas mecánicos y eléctricos.
ORCID: [0000-0002-3146-9755](https://orcid.org/0000-0002-3146-9755)