Desarrollo de Interfaz Gráfica para el Diseño de Filtros FIR Pasa-Bajas Empleando el Método de Ventaneo

Development of a Graphical Interface for the design of Low-Pass FIR Filters using the Windowing Method

Jesús Ángel González Castro*, César Gerardo Parra, David Enrique Castro Palazuelos

*Tecnológico Nacional de México Campus Culiacán, División de estudios de posgrado e investigación, jesus.gc@culiacan.tecnm.mx

Resumen

En la actualidad, los filtros digitales se encuentran presentes en una amplia variedad de sistemas, desempeñando un papel esencial en el procesamiento de señales en múltiples aplicaciones científicas y tecnológicas. Su utilidad principal radica en la capacidad de eliminar componentes de frecuencia no deseados, preservando al mismo tiempo la información relevante de la señal. Esta característica es especialmente crucial en áreas como las telecomunicaciones, instrumentación, y el procesamiento de audio, donde la calidad y precisión de las señales son fundamentales. En este contexto, el presente trabajo se enfoca en el desarrollo de una interfaz gráfica para el diseño de filtros FIR pasa-bajas mediante el método de ventaneo, implementada en el entorno de MATLAB. Para validar su funcionamiento, se diseñaron filtros digitales utilizando distintas ventanas durante el diseño y se compararon los resultados con aquellos generados por la interfaz gráfica nativa de MATLAB. Los resultados evidencian diferencias poco significativas entre los filtros diseñados en ambas herramientas, lo que respalda la correcta simulación y funcionamiento de la interfaz propuesta.

Palabras clave: DSP, filtro FIR, ecuación en diferencias, instrumentación.

Abstract

Today, digital filters are present in a wide variety of systems, playing an essential role in signal processing across multiple scientific and technological applications. Their primary utility lies in their ability to eliminate unwanted frequency components while preserving relevant signal information. This feature is especially crucial in areas such as telecommunications, instrumentation, and audio processing, where signal quality and accuracy are critical. In this context, this work focuses on the development of a graphical interface for the design of low-pass FIR filters using the windowing method, implemented in the MATLAB environment. To validate its operation, digital filters were designed using different windows during the design process, and the results were compared with those generated by the native MATLAB graphical interface. The results show only minor differences between the filters designed in both tools, which supports the correct simulation and operation of the proposed interface.

Keywords: DSP, FIR filter, difference equation, instrumentation.

Recibido: 07/07/2025; Aceptado 04/08/2025; Publicado 25/08/2025

Introducción

El filtrado digital representa la forma más común de procesamiento de señales, su función principal es eliminar componentes de frecuencia no deseadas y optimizar características como la magnitud, la fase o el retardo de grupo en determinadas regiones del espectro de una señal [1].

En comparación con los filtros analógicos, los filtros digitales ofrecen ventajas como una mayor precisión, mejor nivel de relación señal a ruido, menor costo de desarrollo y una elevada confiabilidad. Estas ventajas han llevado a que los filtros digitales estén presentes en casi todas las aplicaciones de procesamiento de señales, como en telecomunicaciones, instrumentación, procesamiento de señales de audio, sistemas de monitoreo, entre otros [2-4].

Los filtros digitales pasa-bajas son elementos clave en el procesamiento de señales, ya que permiten atenuar o reducir las componentes de alta frecuencia no deseadas. Su uso es especialmente relevante, ya que contribuyen significativamente a la eliminación de ruido y a la prevención del aliasing. Esta última función es crucial en sistemas de adquisición de datos, como los convertidores analógico-digitales (del inglés ADC, analog to digital converters) [5].

Por lo tanto, este artículo presenta una interfaz gráfica desarrollada para el diseño de filtros digitales pasa-bajas, que permite al usuario definir de manera flexible las características del filtro según los requerimientos de diseño. La validez de la interfaz se comprueba mediante simulaciones en el entorno de MATLAB/Simulink, y los resultados obtenidos se contrastan con los generados por la herramienta Filter Designer de MATLAB.

Fundamentación Teórica

El término filtro se utiliza comúnmente para referirse a sistemas que son lineales e invariantes en el tiempo, y cuya función principal es permitir el paso de señales que cumplen con ciertos criterios, mientras rechazan aquellas que no lo hacen. Esta capacidad de discriminación se define a través de la respuesta en frecuencia del sistema discreto $H(e^{jw})$, la cual está determinada por la ecs. (1),

$$H(e^{jw}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h(n)e^{-j\omega n}, \qquad (1)$$

donde $h(n)$ representa la respuesta al impulso del sistema y ω corresponde a la frecuencia angular, la cual se encuentra en el intervalo $-\pi < \omega \leq \pi$.

Mediante una selección adecuada de la respuesta al impulso $h(n)$, es posible diseñar sistemas que favorezcan determinadas bandas de frecuencia y atenúen o bloqueen otras, permitiendo así un control preciso del contenido espectral de la señal procesada [6]. Cabe señalar que un filtro digital actúa sobre señales discretas en el tiempo, es decir, señales previamente muestreadas [7].

Los sistemas (filtros digitales) lineales e invariantes en el tiempo pueden ser representados por medio de la ecuación en diferencias en el tiempo discreto presentada en ecs. (2).

$$y[n] = -\sum_{k=1}^{N} a_k y[n-k] + \sum_{k=0}^{M} b_k x[n-k], \qquad (2)$$

donde $y[n]$ y $x[n]$ son la salida y entrada del filtro en el instante n respectivamente, b_k son los coeficientes del polinomio que multiplican a las muestras de la salida $y[n-k]$ (ceros del sistema) y a_k son los coeficientes que multiplican a las muestras de la entrada $x[n-k]$ (polos del sistema). A los sistemas representados con la ecuación (2) también se les conoce como filtros de respuesta al impulso infinita (del inglés IIR, *infinite impulse response*) [8].

En los filtros de respuesta al impulso finita (del inglés FIR, *finite impulse response*) causales, la ecuación en diferencias está conformada únicamente por la sumatoria que contiene el producto de los coeficientes b_k por las muestras de la señal de entrada $x(n-k)$ [7]. Además, debido a que $a_0 = 1$ y $a_k = 0$ para $k = 1,2,\ldots,N$, la ecuación en diferencias se puede expresar en forma reducida mediante la ecs. (3) .

$$y[n] = \sum_{k=0}^{M} b_k x[n-k] \qquad (3)$$

Los filtros digitales pueden representarse mediante distintas estructuras, siendo la forma directa una de las más utilizadas debido a que se obtiene a partir de la ecuación en diferencias o de la función de transferencia, sin requerir modificaciones significativas [7]. La Figura 1 muestra la estructura correspondiente a la forma directa I. En el caso particular de los filtros FIR, al tratarse de sistemas que solo presentan ceros, pueden representarse utilizando únicamente la sección de la izquierda del diagrama mostrado en la Figura 1 y matemáticamente se representa por (3). La Figura 2 presenta la estructura de la forma directa de un filtro FIR, en la cual se considera que su longitud es de orden M.

En la literatura se reportan diversos estudios dedicados al diseño de filtros digitales. En [9], se propone el diseño de un filtro FIR por medio de una ventana construida a partir de funciones base gaussianas equiespaciadas, lo que representa una alternativa novedosa frente a los métodos tradicionales de diseño por ventaneo como Hamming o Kaiser.

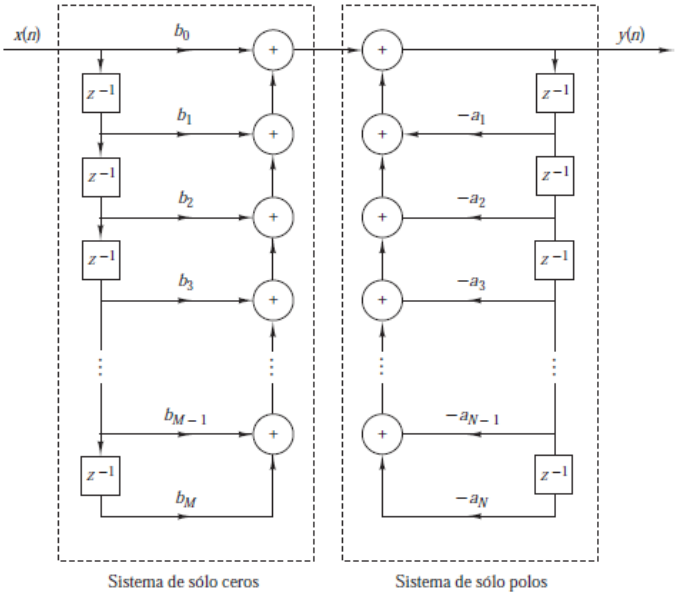

Figura 1. *Estructura de la forma directa I en filtros digitales [7].*

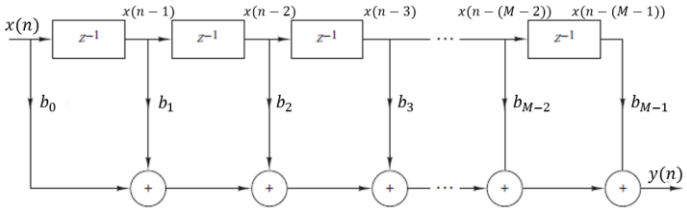

Figura 2. *Estructura de la forma directa de un filtro FIR [7].*

En esta misma línea, en [10] se analiza y diseña un filtro FIR para el procesamiento de señales electroencefalográficas (EEG), aplicando técnicas de ventaneo con el objetivo de eliminar el ruido y mejorar la calidad de la señal, facilitando así su interpretación clínica. Este estudio refuerza la importancia del filtrado como etapa de preprocesamiento de datos en múltiples áreas, tales como el procesamiento de señales biomédicas, de audio, imagen, ciencia de datos e instrumentación.

Metodología

Se desarrolla una interfaz gráfica de usuario (del inglés GUI, *graphical user interface*) en el entorno de MATLAB, orientada a facilitar el proceso de diseño de filtros digitales FIR pasa-bajas mediante el método de ventaneo, para evitar confusiones, en este trabajo se le nombrará interfaz de filtros pasa-bajas (InterfazVentaneoFPB). Esta

herramienta interactiva permite al usuario configurar de forma intuitiva los parámetros fundamentales del filtro como son: las frecuencias de corte en las bandas de paso y de rechazo, el rizado permitido en la banda de paso y la atenuación en la banda de rechazo. Además, la interfaz brinda la posibilidad de seleccionar el tipo de ventana a emplear en el diseño (Rectangular, Bartlett, Hann, Hamming o Blackman), así como la frecuencia de muestreo del sistema.

La interfaz gráfica proporciona información clave del diseño, como el orden del filtro, la frecuencia de corte y los coeficientes b_k correspondientes. Asimismo, incluye un conjunto de representaciones gráficas que permiten un análisis exhaustivo del comportamiento del filtro, tales como la respuesta al impulso, las respuestas en magnitud y fase, y el diagrama de polos y ceros. Estas visualizaciones resultan necesarias para validar las especificaciones del diseño y verificar el cumplimiento de los requerimientos previamente establecidos.

A continuación, se muestra un ejemplo representativo del proceso de diseño de un filtro digital FIR utilizando la InterfazVentaneoFPB, en el cual se especificaron las siguientes características del filtro utilizando una ventana rectangular:

- Frecuencia de corte en la banda de paso (ω_p): 0.2 π rad.
- Frecuencia de corte en la banda de rechazo (ω_s): 0.3 π rad.
- Rizado en la banda de paso (R_p): -3 dB.
- Atenuación en la banda de rechazo (A_s): -40 dB.
- Frecuencia de muestreo (f_s): 50 KHz.

La Figura 3 presenta la respuesta en frecuencia teórica ideal del filtro y la Figura 4 muestra el diagrama a bloques que describe los pasos necesarios para obtener los coeficientes del filtro utilizando el método de ventaneo, sobre el cual se basa el funcionamiento de la InterfazVentaneoFPB .

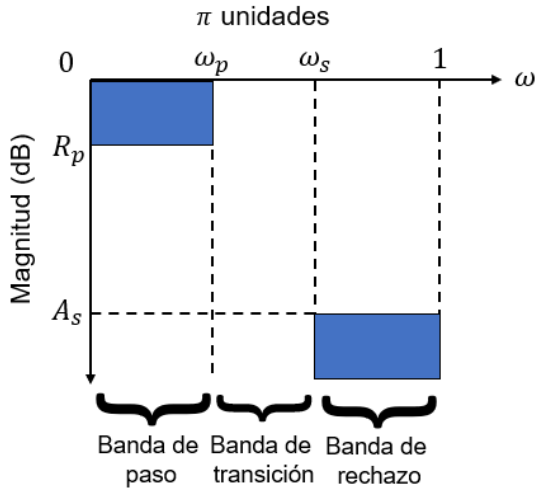

Figura 3. *Respuesta en frecuencia teórica deseada del filtro.*

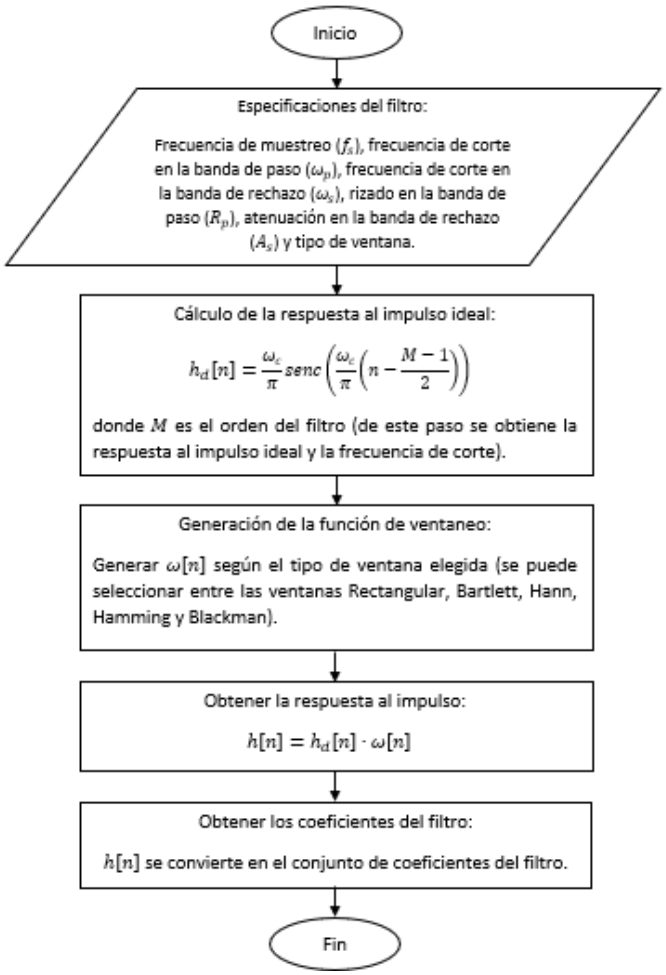

Figura 4. *Pasos necesarios para obtener los coeficientes del filtro utilizando el método de ventaneo.*

La Figura 5 ilustra el resultado de la generación de un filtro FIR pasa-bajas en la InterfazVentaneoFPB usando una ventana rectangular.

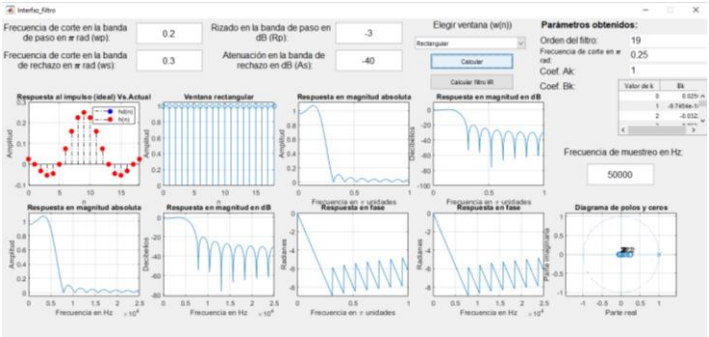

Figura 5. *Resultado de la generación de un filtro FIR en la interfaz FPB usando una ventana rectangular.*

Con el objetivo de validar la funcionalidad de la interfaz gráfica y el comportamiento de las distintas ventanas disponibles para el diseño de filtros digitales, se realizaron pruebas por medio de simulación. En la Figura 6 se visualiza la respuesta de cada filtro diseñado con las

diferentes ventanas, ante una señal senoidal de 10 kHz y 0.9 volts de amplitud ($x[n]$). Para asegurar una comparación justa, se mantuvieron constantes las especificaciones utilizadas con la ventana rectangular, variando únicamente el tipo de ventana.

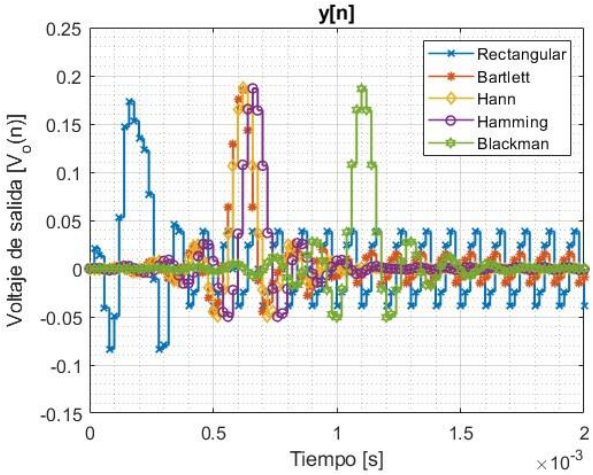

Figura 6. *Comparación de la respuesta de los filtros diseñados mediante diferentes ventanas en la InterfazVentaneoFPB.*

La Tabla 1 presenta un análisis comparativo entre los parámetros obtenidos mediante la InterfazVentaneoFPB y los resultados de la simulación para cada caso.

Tabla 1.
Análisis comparativo entre la InterfazVentaneoFPB y la simulación realizada en Simulink.

Ventana	Número de coeficientes (M)	Señal filtrada	Ganancia de amplitud (A)	Atenuación (dB)
Rectangular	19	Interfaz	0.045143	-26.9129
		Simulación	0.045147	-26.9111
Bartlett	62	Interfaz	0.017830	−34.9726
		Simulación	0.017827	−34.9730
Hann	63	Interfaz	0.000140	−77.0774
		Simulación	0.000140	−77.0774
Hamming	67	Interfaz	0.001590	−55.9720
		Simulación	0.001588	−55.9778
Blackman	111	Interfaz	0.000023	−92.7661
		Simulación	0.000023	−92.7661

Cabe señalar que MATLAB almacena las variables numéricas como valores en punto flotante de doble precisión, utilizando 8 bytes (64 bits) de memoria conforme al estándar IEEE 754-2008 [11]. Por lo tanto, los filtros diseñados y simulados cuentan con estas características.

De acuerdo con el análisis presentado en la Tabla 1, únicamente los filtros diseñados con las ventanas de Hann, Hamming y Blackman cumplen con el requisito de una atenuación en la banda de rechazo inferior a -40 dB. Para este trabajo se seleccionó la ventana de Hann, debido a que requiere un menor número de coeficientes, y en consecuencia, una menor cantidad de memoria para su implementación.

Con el objetivo de validar el comportamiento del filtro diseñado mediante la ventana de Hann, se llevaron a cabo tres simulaciones en el entorno MATLAB/Simulink. En cada simulación se utilizó como entrada una señal senoidal de 0.9 volts de amplitud, variando únicamente su frecuencia para representar tres escenarios distintos: una señal dentro de la banda de paso, otra en la banda de transición y una tercera en la banda de rechazo del filtro.

Las Figuras 7, 8 y 9 presentan los resultados de las simulaciones realizadas para señales de entrada senoidales con frecuencias de 1 kHz, 6 kHz y 10 kHz, respectivamente, correspondientes a la banda de paso, la banda de transición y la banda de rechazo del filtro diseñado. En cada caso, se puede observar cómo varía la respuesta del sistema en función de la frecuencia de la señal de entrada, lo cual permite evaluar la capacidad del filtro para atenuar o permitir el paso de determinadas componentes de frecuencia. Adicionalmente, la Tabla 2 expone un análisis comparativo entre los parámetros obtenidos a través del diseño realizado con la InterfazVentaneoFPB y los obtenidos mediante simulación.

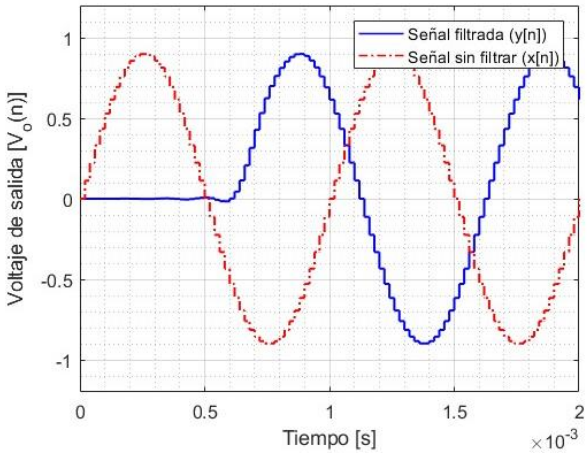

Figura 7. *Simulación del funcionamiento del filtro diseñado mediante una ventana de Hann al aplicar una señal en la banda de paso (1KHz).*

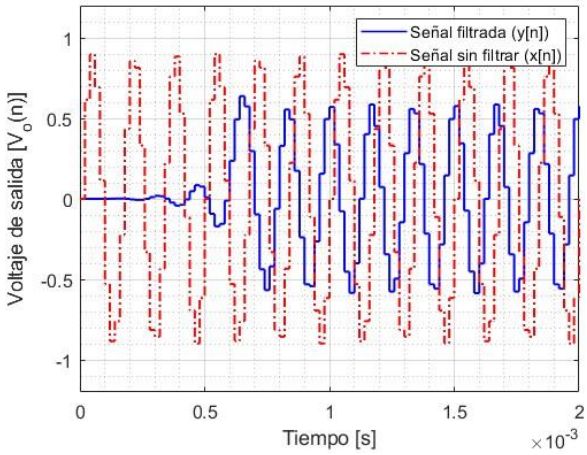

Figura 8. *Simulación del funcionamiento del filtro diseñado mediante una ventana de Hann al aplicar una señal en la banda de transición (6KHz).*

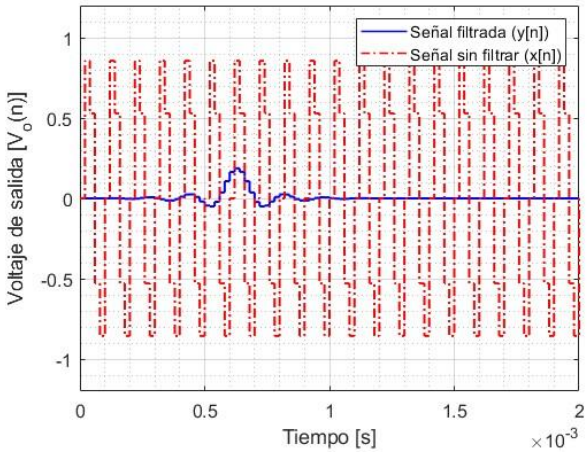

Figura 9. *Simulación del funcionamiento del filtro diseñado mediante una ventana de Hann al aplicar una señal en la banda de rechazo (10KHz).*

Tabla 2.

Análisis comparativo entre la InterfazVentaneoFPB y la simulación realizada en Simulink.

Frecuencia de la señal de entrada	Señal filtrada	Ganancia de amplitud (A)	Atenuación en decibelios (dB)
1 kHz	Interfaz	0.999952	−0.000417
	Simulación	0.999809	-0.000165
6 kHz	Interfaz	0.651833	-3.719740
	Simulación	0.651721	-3.720720
10 kHz	Interfaz	0.000140	−77.077435
	Simulación	0.000140	−77.077435

Resultados

Para validar la InterfazVentaneoFPB, se realizó una comparación con la herramienta Filter Designer de MATLAB. Esta interfaz, incluida en el Signal Processing Toolbox, permite diseñar y analizar filtros digitales FIR o IIR de forma rápida mediante la definición de especificaciones del filtro [12].

La principal diferencia entre Filter Designer y la InterfazVentaneoFPB radica en los parámetros de entrada. Mientras que Filter Designer solicita directamente al usuario frecuencia de corte ω_c, en la InterfazVentaneoFPB esta se calcula a partir de los parámetros ω_p y ω_s. Otra diferencia es que Filter Designer requiere que el usuario especifique el orden del filtro, mientras que en la InterfazVentaneoFPB dicho valor se determina automáticamente.

Otra diferencia importante se encuentra en la visualización de los gráficos de salida. Al diseñar el filtro con frecuencia normalizada, Filter Designer solo permite representar los resultados en términos de frecuencia normalizada frente a amplitud en decibelios, mientras que la InterfazVentaneoFPB ofrece una visualización más flexible, permitiendo mostrar la amplitud tanto en escala lineal como en decibelios, y la frecuencia en Hz.

La Figura 10 presenta el resultado del diseño del filtro FIR en la InterfazVentaneoFPB usando una ventana de Hann bajo las mismas especificaciones de diseño planteadas en la Metodología.

La Figura 11 ilustra la interfaz gráfica proporcionada por la herramienta Filter Designer, donde se configuró un filtro FIR pasa-bajas utilizando el método de ventaneo. Se estableció un orden de 62 (lo que equivale a 63 coeficientes), una ventana de Hann y una frecuencia de corte normalizada de 0.25π radianes. Estos parámetros fueron seleccionados con el fin de generar un filtro equivalente al diseñado con la interfaz gráfica presentada en este trabajo, con el objetivo de comparar el comportamiento y la respuesta de ambos diseños bajo las mismas condiciones de prueba.

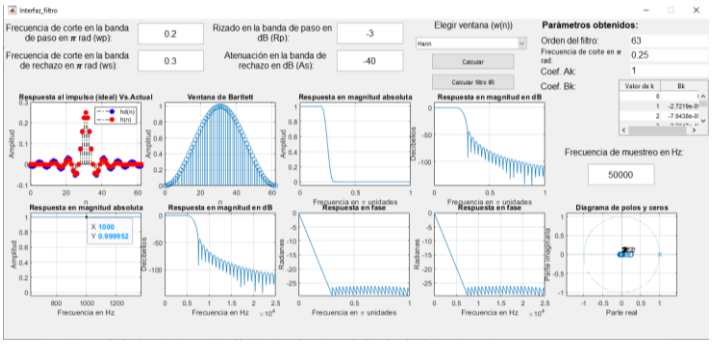

Figura 10. *Diseño del filtro mediante una ventana de Hann usando la InterfazVentaneoFPB.*

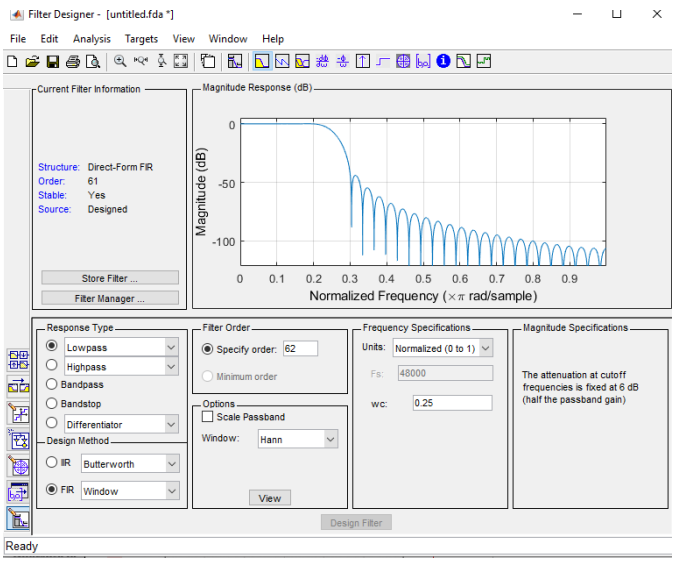

Figura 11. *Diseño del filtro mediante una ventana de Hann usando la herramienta Filter Designer de MATLAB.*

La Figura 12, presenta una comparación gráfica de la respuesta al impulso unitario $h(n)$, equivalente a los coeficientes del filtro, obtenida mediante ambas interfaces gráficas. Se observa que los valores son prácticamente idénticos.

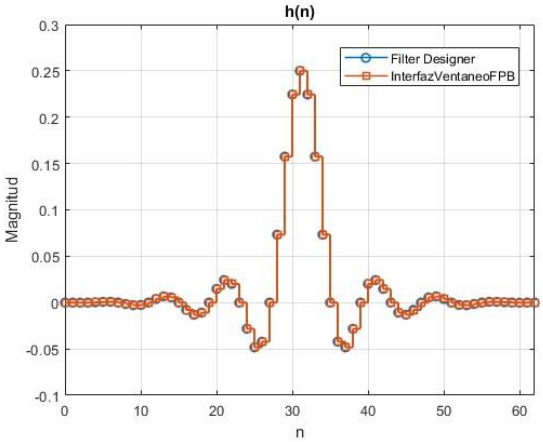

Figura 12. *Comparación gráfica de la respuesta al impulso unitario* $h(n)$*, equivalente a los coeficientes del filtro, obtenida mediante la InterfazVentaneoFPB y Filter Designer.*

Las Figuras 13, 14 y 15 ilustran una comparación mediante simulación entre el filtro diseñado mediante una ventana de Hann utilizando la InterfazVentaneoFPB y el filtro generado mediante la herramienta Filter Designer de MATLAB al aplicar una entrada senoidal con una frecuencia de 1 kHz, 6 kHz, y 10 kHz respectivamente y una amplitud de 0.9 volts. Esta comparación se realiza con el fin de analizar y contrastar las respuestas de los filtros obtenidos en el dominio del tiempo discreto.

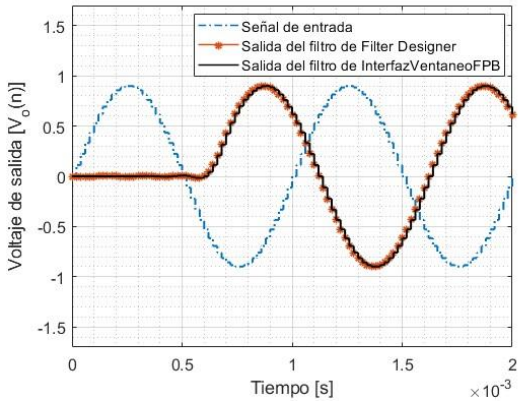

Figura 13. *Comparación entre la repuesta del filtro diseñado mediante InterfazVentaneoFPB y la respuesta del filtro obtenido mediante Filter Designer para una señal de entrada en la banda de paso (1 kHz).*

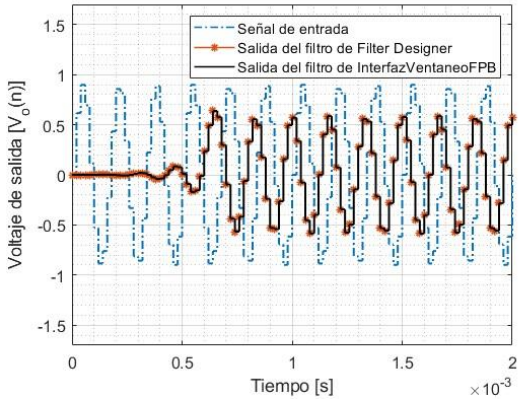

Figura 14. *Comparación entre la repuesta del filtro diseñado mediante InterfazVentaneoFPB y la respuesta del filtro obtenido mediante Filter Designer para una señal de entrada en la banda de transición (6 kHz).*

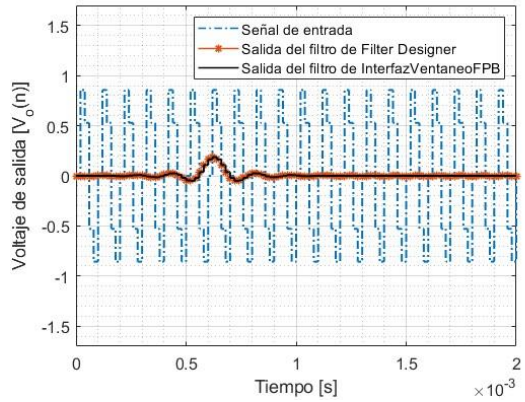

Figura 15. *Comparación entre la repuesta del filtro diseñado mediante InterfazVentaneoFPB y la respuesta del filtro obtenido mediante Filter Designer para una señal de entrada en la banda de rechazo (10 kHz).*

El análisis comparativo permite verificar que el filtro implementado a través de la InterfazVentaneoFPB ofrece un desempeño equivalente al proporcionado por la herramienta Filter Designer, lo que valida la efectividad del diseño.

Conclusiones

En este trabajo se presenta una interfaz gráfica desarrollada específicamente para el diseño de filtros digitales FIR pasa-bajas empleando el método de ventaneo, implementada en el entorno de MATLAB. Con el objetivo de validar su funcionamiento, se llevan a cabo simulaciones en Simulink que permiten visualizar de manera clara la respuesta de los filtros diseñados, utilizando distintos tipos de ventanas. Además, se incluye la comparación con un filtro equivalente generado mediante la herramienta Filter Designer, a fin de contrastar los resultados obtenidos con la interfaz propuesta.

A través del análisis realizado se puede constatar que la InterfazVentaneoFPB proporciona información relevante y coherente, que concuerda en gran medida con los resultados obtenidos mediante simulación. Además, se observa que, al aumentar el orden del filtro digital el número de coeficientes mediante las diferentes ventanas crece, se incrementa la atenuación en la banda de rechazo y se reduce la banda de transición, sin embargo, la memoria y el número de operaciones a realizar (suma de productos) se incrementan, lo que conlleva un mayor costo computacional.

A través de las pruebas realizadas se encontró que no existen diferencias significativas entre el filtro generado por la interfaz gráfica desarrollada (InterfazVentaneoFPB) y el obtenido mediante Filter Designer, con esto se puede constatar que la GUI presentada en este proyecto es fiable, además de ser fácil de utilizar y amigable con el usuario.

Como trabajo futuro se visualiza la implementación de este tipo de filtros digitales en diferentes plataformas de *hardware* como microcontroladores, procesadores digitales de señales (del inglés DSP, *digital signal processors*), arreglos de compuertas programables en campo (del inglés FPGA, *field, programmable gate array*), entre otras.

Referencias

[1] B. A. Shenoi, Introduction to Digital Signal Processing and Filter Design. Hoboken, NJ, USA: Wiley-Interscience, 2006.

[2] T. I. Laakso, V. Valimaki, M. Karjalainen and U. K. Laine, “Splitting the unit delay [FIR/all pass filters design],” IEEE Signal Processing Magazine, vol. 13, no. 1, pp. 30-60, 1996.

[3] G. Stoyanov and M. Kawamata, “Variable digital filters,” Journal of Signal Processing, vol. 1, no. 4, pp. 275–289, 1997.

[4] O. A. Jumaev, D. S. Karpovic y M. T. Ismoilov, “Methods for digital signal processing and digital filter synthesis,” AIP Conference Proceedings, vol. 2656, 2022.

[5] A. O. M. Salih, “Audio Noise Reduction Using Low Pass Filters,” Open Access Library Journal, vol. 4, no. 11, pp. e3709, 2017.

[6] A. V. Oppenheim, y R. W. Schafer, Tratamiento digital de señales. Madrid, España: Pearson, 2011.

[7] J. G. Proakis, y D. G. Manolakis, Tratamiento de señales en tiempo discreto. Madrid, España: Pearson Prentice Hall, 2007.

[8] S. W. Smith, The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing, 2nd ed. San Diego, Estados Unidos: California Technical Publishing, 1997.

[9] R. Avanzato, F. Beritelli, G. Capizzi y G. Lo Sciuto " A new design methodology for window-based FIR filters," Electronics Letters, 2023, vol. 59, no. 11, pp. e12815.

[10] A. Pant y A. Kumar, "EEG Signal Filtering Using Rectangular FIR Window Method," 2024 International Conference on Computer, Electronics, Electrical Engineering & their Applications (IC2E3), Srinagar Garhwal, Uttarakhand, India, 2024, pp. 1-7.

[11] MATLAB Help Center. Fundamental MATLAB Classes. Disponible en: https://www.mathworks.com/help/matlab/matlab_prog/fundamental-matlab-classes.html

[12] MATLAB Help Center. Introduction to Filter Designer. Disponible en; https://www.mathworks.com/help/signal/ug/introduction-to-filter-designer.html

Semblanza Autores

Jesús Ángel González Castro es Ingeniero en Mecatrónica (2022) y Maestro en Ciencias de la Ingeniería (2024) por el TecNM Campus Culiacán. Actualmente, es estudiante de doctorado en el TecMN campus Culiacán.

Cesar Gerardo Parra es Ingeniero en Electrónica (2023) y estudiante de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería del Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán.

David Enrique Castro Palazuelos Ingeniero Electrónico por el Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán (2000). Maestro en Ciencias en Telemática por la Universidad de Colima (2004) y Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica con especialización en Telecomunicaciones por el CINVESTAV del IPN, Unidad Guadalajara (2015).