

Plantillas de Ayuda en el Diseño de Circuitos Electrónicos Analógicos

Julieta Prieto-Tarzia, Lucía González-Sobrino, Herminio Martínez-García
 Eastern Barcelona School of Engineering (Escuela de Ingeniería de Barcelona Este – EEBE)
 Departamento de Ingeniería Electrónica
 Technical University of Catalonia (Universidad Politécnica de Cataluña –UPC–), BarcelonaTech
 Avda. Eduard Maristany, nº 10 – 14.
 E-08019 – Barcelona, Spain
julieta.prieto@estudiant.upc.edu; lucia.gonzalez@estudiant.upc.edu; herminio.martinez@upc.edu

Resumen—En este artículo se presenta los resultados obtenidos en la exploración de herramientas informáticas desarrolladas con diversos programas como son Excel®, Matlab® y Pspice-Orcad®, con el fin de poder automatizar procesos de cálculo relacionados con el diseño de circuitos electrónicos analógicos en diferentes áreas de la Ingeniería Electrónica que tanto estudiantes como profesionales deben realizar frecuentemente. Se presentará el proceso que se ha seguido para poder realizarlas así como los resultados obtenidos con las mismas.

Palabras clave—Filtrado analógico de la señal, filtrado digital de la señal, orden de un filtro, gálbo, ventana.

I. INTRODUCCIÓN

Tanto estudiantes como profesionales de la Ingeniería Electrónica deben enfrentarse en sus tareas diarias al diseño y simulación de múltiples circuitos electrónicos. Desde la concepción de un circuito hasta la implementación física final, pasando por el proceso de diseño, cálculo de componentes que lo forman, así como la estandarización de los mismos, se consume una cantidad de tiempo muy elevada, especialmente en circuito analógicos o mixtos. Además, al ser realizados manualmente, siempre se pueden producir fallos que un programa informático obviamente no cometería. Estos hechos fueron los que motivaron la creación de una serie de herramientas prácticas, que pudieran estar al alcance de todos los que lo necesiten.

En concreto, las citadas herramientas aparecen como necesidad para el diseño de sistemas de filtrado dirigidas a estudiantes de la asignatura obligatoria *Electrónica Analógica*, de 5º cuatrimestre del Grado de Ingeniería Electrónica Industrial y Automática de la Escuela de Ingeniería de Barcelona Este (EEBE) de la UPC, para poder automatizar una serie de cálculos que suelen ser realizados muy frecuentemente por estudiantes del mencionado grado.

En este artículo se presentarán algunas de ellas, principalmente las que engloban diferentes tipos de filtros, tanto digitales como analógicos, mostrando las fórmulas y el

proceso que se ha seguido para crear las plantillas, así como los resultados que pueden ser obtenidos a través de las mismas.

Los programas que han sido más utilizados para su realización son Excel® para la realización de cálculos, Matlab® para la simulación de la respuesta de los filtros digitales y Pspice-Orcad® para la simulación de circuitos analógicos implementados mediante los cálculos realizados previamente en Excel®.

II. FILTROS ANALÓGICOS

Como es sobradamente conocido, en muchas aplicaciones se requiere realizar un filtrado de una señal determinada, normalmente para eliminar frecuencias no deseadas o para acotar el rango frecuencial de la misma. Para solventar este requerimiento, se emplean filtros analógicos normalmente activos, ya que presentan mayores ganancias y evitan la utilización de inductancias (las cuáles introducen grandes efectos parásitos en el circuito).

Un tipo de filtros muy utilizados, especialmente en aplicaciones de baja frecuencia, como son en aplicaciones de audio o de ingeniería biomédica, suelen ser filtros simples de primer o segundo orden, los cuales no presentan una gran dificultad en el cálculo, ya que la frecuencia natural de la célula es inversamente proporcional a la constante de tiempo de la célula en cuestión, de acuerdo con (1).

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

De esta forma, fijando el valor de uno de los componentes pasivos, y sabiendo la frecuencia natural de la célula, puede obtenerse el valor del otro componente pasivo.

En ciertas ocasiones, con este tipo de filtros no es suficiente, ya que no son capaces de atenuar el valor tanto como lo requiere el circuito. Por este motivo, se procede a la utilización de filtros analógicos de orden superior, como

pueden ser los de Butterworth, Chebyshev, Legendre, Cauer o Bessel [1], [2].

El cálculo para dichos filtros es más complicado, ya que el orden de los mismos no siempre puede determinarse analíticamente debido a la alta complejidad de los polinomios que deben ser resueltos para encontrar el resultado. Por esto, en determinadas ocasiones, debe recurrirse a métodos gráficos, mediante el empleo de tablas o métodos gráficos como el uso de gálibos, tal y como podemos apreciar en la Fig. 1, de los filtros. Para poder solucionar este tipo de filtros se deben conocer los siguientes parámetros o especificaciones de diseño:

- Frecuencia máxima de la banda pasante, ω_p o f_p .
- Frecuencia mínima de la banda atenuada, ω_a o f_a .
- Atenuación máxima permitida en la banda de paso, A_{max} .
- Atenuación mínima permitida en la banda atenuada, A_{min} .

Una vez se establecen estos parámetros, se puede encontrar el orden necesario del filtro trazando una recta vertical en ω_p/ω_a y una horizontal a partir de A_{max} y A_{min} . La curva inmediatamente superior a la intersección de ambas rectas proporcionará el orden del filtro. Una vez determinado, solo deben implementarse diversas células en cascada para poder alcanzarlo.

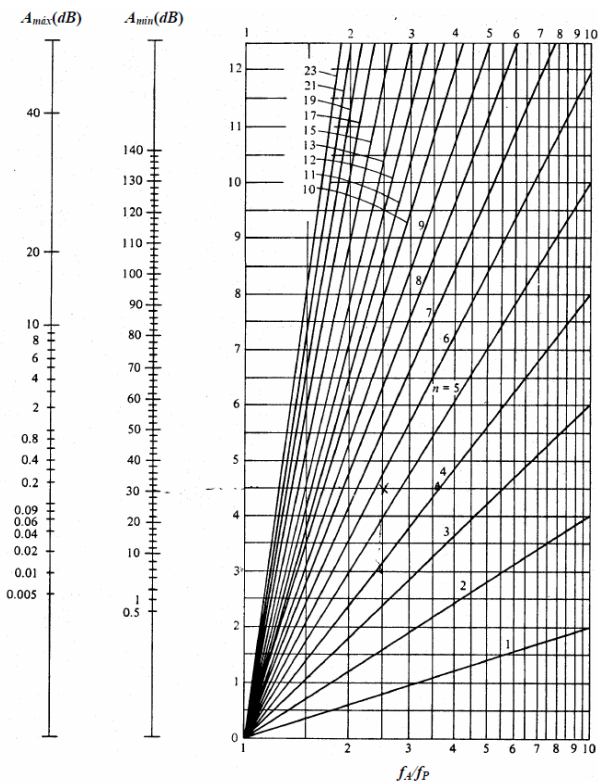


Fig. 1.- Gálipo para determinar el orden n de un filtro empleando la aproximación de Butterworth [2].

III. FILTROS DIGITALES

Los filtros digitales son utilizados primordialmente cuando los analógicos no presentan la suficiente precisión, pendiente de caída en la respuesta, o rapidez que requiere el sistema. En efecto, dicho tipo de filtros permiten órdenes mucho mayores y, por tanto, presenta unas pendientes mucho más pronunciadas, lo que permite, a su vez, acotar de mejor forma el rango frecuencial de una señal, sobre todo si las frecuencias entre las que se desea discernir están muy próximas las unas de las otras.

Existen dos grandes tipos de filtros digitales: filtros de respuesta al impulso infinita (IIR) y finita (FIR). Este artículo se centrará en la implementación de los últimos, ya que son los más utilizados de los dos debido a su sencilla implementación frente a los de respuesta infinita (los cuales requieren un coste computacional más elevado) [3].

Hay diferentes formas de diseñar un filtro digital, siendo la más común el diseño basado en ventanas. Este método consiste en el truncamiento de la respuesta al impulso $h[n]$ de un filtro ideal con respuesta en frecuencia $H(F)$. La respuesta de un filtro ideal pasa-bajos con una frecuencia de corte F_C es $h[n] = 2F_C \text{sinc}(2NF_C)$, de modo que su truncamiento simétrico será:

$$h_N[n] = 2F_C \text{sinc}(2NF_C) \quad , \quad |n| \leq 0,5(N-1) \quad (2)$$

El truncamiento de la respuesta al impulso $h[n]$ equivale a la multiplicación de $h[n]$ por una ventana rectangular $w[n]$ de longitud N . El espectro de la respuesta al impulso con ventana $h_w[n] = h[n]w[n]$ es la convolución (periódica) de $H(F)$ y $W(F)$ [4].

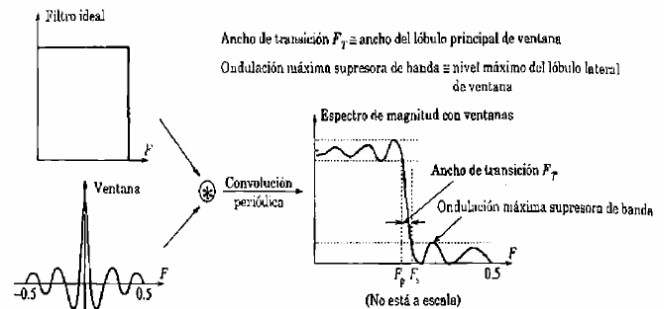


Fig. 2.- Espectro de la respuesta al impulso [5].

Existen diversos tipos de ventanas que pueden ser aplicadas con el fin de filtrar una determinada señal, y debe determinarse empíricamente cuál de ellas es la más adecuada para la aplicación en concreto.

Para la selección de la ventana, deben conocerse una serie de valores, entre otros parámetros, porque no siempre son aplicables todos los tipos de ventanas. Dichos parámetros son:

- Frecuencia máxima de la banda pasante, ω_p o f_p .
- Frecuencia mínima de la banda atenuada, ω_a o f_a .
- Atenuación máxima en la banda pasante, A_{max} .
- Atenuación mínima en la banda atenuada, A_{min} .
- Frecuencia de muestreo, S .
- Frecuencia digital de la banda pasante, $F_p = f_p / S$.
- Frecuencia digital de la banda atenuada, $F_a = f_a / S$.

Una ventana tiene una serie de parámetros asociados a ellas según los cuales se determinará si es válida o no:

- Ondulación máxima de la banda pasante y la banda de atenuación, $\delta_p = \delta_s$ (ver Fig. 2).
- Atenuación máxima en la banda pasante, A_{max} .
- Atenuación máxima del filtro de la banda atenuada, A_{WA} .
- Atenuación pasa-banda, A_{WP} .
- Ancho de transición, $F_T = F_a - F_p = F_{WA} \approx C / N$, donde C es un parámetro constante propio de cada una de las ventanas.
- Frecuencia de muestreo, S .

La selección de una ventana se basa principalmente en la especificación del diseño de la banda de supresión A_{min} . La atenuación máxima del filtro de la banda atenuada A_{WA} del espectro al que se le aplica la ventana debe alcanzar (o exceder) la atenuación mínima en la banda atenuada, A_{min} . Por su parte, la atenuación pasa-banda A_{WP} no debe exceder la atenuación especificada A_{max} .

IV. PLANTILLAS EXCEL® PROPUESTAS

A. Filtros Analógicos

Con el fin de facilitar el diseño de filtros analógicos, se han realizado diferentes plantillas para los citados filtros, las cuales comprenden filtros pasa-altos, pasa-bajos y pasa-banda de diversos órdenes. Para ejemplificar los resultados que pueden ser obtenidos, se utilizará un filtro pasa-bajos.

Para realizar un sencillo cálculo de un filtro de primer orden, sirviendo para cualquiera de las variantes que se han mencionado previamente, el usuario deberá introducir la frecuencia de corte del filtro y la desviación que puede sufrir la frecuencia respecto a la deseada por efecto de la estandarización de los componentes, tal y como aparece en la Tabla I.

TABLA I.
PARÁMETROS A INTRODUCIR POR EL USUARIO

Frequency cut-off (Hz)	Frequency tolerance error (%)
32,546	1,000

Una vez ya se han introducido estos parámetros, se puede

elegir entre si se desea realizar un cálculo semi-manual; es decir, si se quiere establecer el valor de condensadores o de resistores, o si se quiere hacer completamente automático. Si se elige la opción de hacerlo semi-manual el usuario se encontrará con las opciones mostradas en la Tabla II.

TABLA II.
CÁLCULO SEMI-MANUAL DEL FILTRO A DISEÑAR

Stablish Capacitor value		
Capacitor (F)	Multiplier	Resistance (Ω)
1,800	0,000001	2716,752

Stablish Resistor value		
Resistance (Ω)	Multiplier	Capacitor (F)
1210,000	1,000	4,041E-06

En la citada Tabla II puede verse cómo puede elegirse establecer el valor del condensador o de la resistencia. Para ello, se desplegará una lista de los valores normalizados y, *a posteriori*, se le podrá añadir el factor multiplicador que se desee, para realizar unos cálculos con valores normalizados. Cabe destacar que el valor del componente calculado no presenta un valor estándar.

En caso de elegir que todo el proceso sea realizado automáticamente, sin la introducción de ningún otro parámetro que la frecuencia y su máxima desviación, el programa retornará al usuario, de entre todas las posibilidades de valores estándares, la que proporcione una frecuencia que presente menor error respecto a la deseada, así como la frecuencia real y su desviación.

Además, se proporcionarán una serie de cálculos para ver cuál sería la máxima desviación que podrían sufrir los componentes debido a la tolerancia de su serie (serie E-96 para resistores y E-12 para condensadores), y cómo afectaría esto a la frecuencia de corte deseada (ver Tabla III).

TABLA III.
CÁLCULO AUTOMÁTICO DEL FILTRO A DISEÑAR

Resistor (Ω)	Capacitor (F)	Frequency error (%)
48,700	1,00E-04	0,414
Real w (rad/s)	Real frequency (Hz)	
205,339	32,681	

Maximum Resistor (Ω)	Minimum Resistor (Ω)	Minimum Frequency (Hz)
4,92E+01	4,82E+01	29,416
Maximum Capacitor (F)	Minimum Capacitor (F)	Maximum Frequency (Hz)
1,10E-04	9,00E-05	36,679

El proceso de normalización de componentes y de resolución automática del filtro ha podido realizarse gracias a la creación de *macros* en Excel® utilizando Visual Basics®, donde se han creado las fórmulas necesarias para ello.

En caso de que se desee implementar un filtro de orden superior, se deberá recurrir a alguna de las aproximaciones comentadas en apartados anteriores. Para ello, se ha procedido a representar gráficamente el gálbo en Excel® a través de los polinomios de aproximación, de forma que cuando el usuario introduzca los parámetros necesarios para encontrar el orden del filtro (Tabla IV), se encuentre automáticamente la intersección entre las rectas que lo dictarán.

TABLA IV.
PARÁMETROS A INTRODUCIR POR EL USUARIO

Maximum Pass-Band Frequency f_p (Hz)	Pass-Band Frequency f_p	Frequency tolerance error (%)
30,000		1,000
Minimum Stop-Band Frequency f_s (Hz)	Maximum Attenuation in Pass-Band Frequency A_{max} (dB)	Minimum Attenuation in Stop-Band Frequency A_{min} (dB)
70,000	-3,000	-20,000

Con los valores superiores se representarán gráficamente, y de forma automática, las dos rectas correspondientes sobre los gálbos ya creados.

A modo de ejemplo, a continuación, se presentan los resultados que se obtendrían aplicando estos parámetros para diferentes tipos de aproximaciones. Debe recordarse que el orden del filtro se corresponderá con la curva inmediatamente superior a la intersección de ambas rectas.

Con los parámetros anteriormente establecidos, se ha encontrado que mediante una aproximación de Butterworth se necesitará orden 3 (Fig. 3), igual que utilizando Chebyshev (Fig. 4) y Legendre (Fig. 5).

Una vez ya se ha determinado el orden del filtro, que será lo que indique el número de células en cascada que deberán conectarse, el usuario nuevamente podrá realizar los pasos que previamente han sido explicados para elegir si desea calcular los componentes de forma totalmente automática o semi-manual.

B. Filtros Digitales

En el caso de los filtros digitales, se ha realizado una plantilla Excel® que pueda ser leída directamente por Matlab®, donde se podrán realizar las simulaciones de la respuesta de

los mismos.

Para poder elegir qué ventana será válida de todas las posibles, se deberán establecer una serie de valores (ver Tabla V).

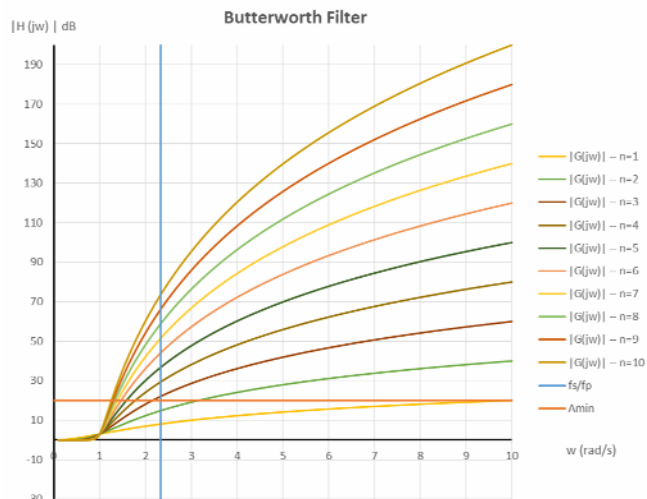


Fig. 3.- Ejemplo concreto del resultado gráfico para determinar el orden de un filtro mediante una aproximación de Butterworth.

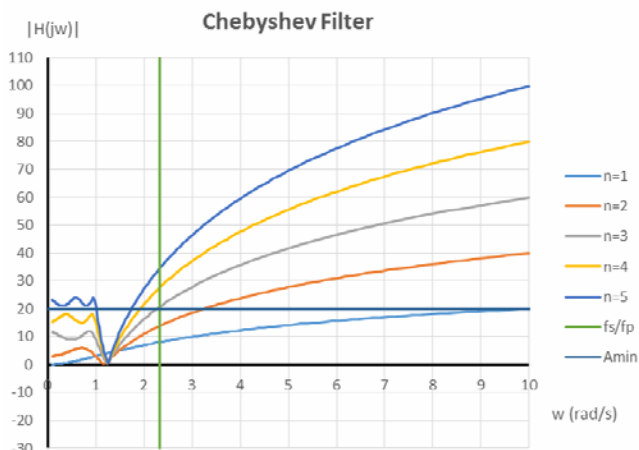


Fig. 4.- Ejemplo concreto del resultado gráfico para determinar el orden de un filtro mediante una aproximación de Chebyshev.

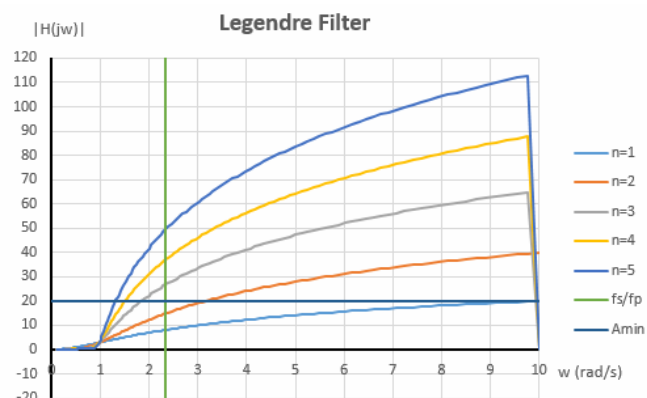


Fig. 5.- Resultado gráfico para una aproximación de Legendre.

TABLA V.

PARÁMETROS A INTRODUCIR POR EL USUARIO

Maximum Pass-Band Frequency f_p (Hz)	Minimum Stop-Band Frequency f_s (Hz)
43,000	45,000
Minimum Attenuation in Stop-Band Frequency A_s (dB)	Maximum Attenuation in Pass-Band Frequency A_p (dB)
40,000	1,000
Sample Frequency S (Hz)	
250,000	

A continuación, aparecerán, señaladas en color verde, aquellas propiedades de las ventanas que cumplen las condiciones y, destacadas en color rojo, las que no las cumplen, de forma que el usuario pueda elegir, entre las que sí son válidas, la que desea aplicar (ver Tabla VI).

TABLA VI.

POSIBLES VENTANAS CON SUS PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS

Window	δ_p	A_{wp} (dB)	A_{WA} (dB)	C
Boxcar	0,0897	1,5618	21,7	0,92
Cosinus	0,0207	0,36	33,8	2,1
Riemann	0,012	0,2087	38,5	2,5
VonHann	0,0063	0,1103	44	3,21
Hamming	0,0022	0,0384	53	3,47
Blackman	0,000171	0,00297	75,3	5,71
Dolph (R = 40 dB)	0,0036	0,062	49	3,16
Dolph (R = 50 dB)	0,000954	0,0166	60,4	3,88
Dolph (R = 60 dB)	0,00025	0,0043	72	4,6
Harris (0)	0,000855	0,0148	61,4	5,36
Harris (1)	0,000141	0,00244	77	7,45
Harris (2)	0,000118	0,00206	78,5	5,6
Harris (3)	0,000089	0,00156	81	5,6
Harris (4)	0,000092	0,00161	81	5,6
Harris (5)	0,000009	0,00017	100	7,75
Harris (6)	0,000001	0,00003	114	7,96
Harris (7)	0,000005	0,00009	106	7,85

La primera de las celdas es una lista desplegable con las ventanas válidas. Al seleccionar una, los demás valores de la tabla se calcularán automáticamente (Tabla VII).

Dependiendo de qué tipo de ventana haya sido seleccionada, mediante el programa Matlab® [6], se realizará una lectura de los parámetros que han sido introducidos en Excel®, así como de los parámetros de la ventana elegida y se

simulará la respuesta frecuencial del mismo.

TABLA VII.

ELECCIÓN DE VENTANAS Y CARACTERÍSTICAS

Window	C	Digital Frequency Fp
VonHann	3,21	0,172
N	Digital Frequency Fs	
402	0,18	
Fc	wc	
0,176000	1,105840614	
Fc (Hz)		
22		

V. RESULTADOS

Para ejemplificar los resultados que pueden obtenerse mediante la aplicación de este tipo de filtros, se ha simulado una señal de entrada correspondiente a actividad cerebral en sistemas encefalogramas (EEG), tal y como muestran la Fig. 6 (señal temporal de la señal de entrada que emula el comportamiento de la actividad cerebral), y Fig. 7 (espectro frecuencial de la citada señal) [7].

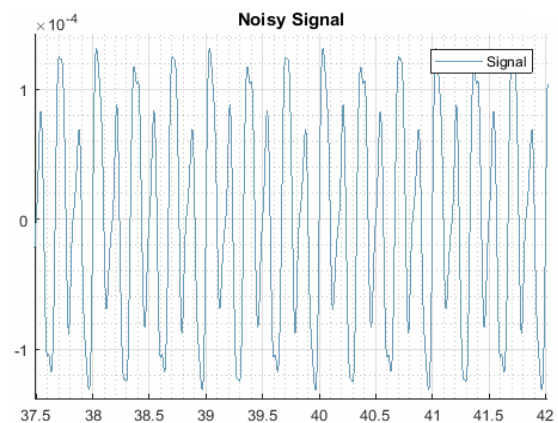


Fig. 6.- Aspecto temporal de la señal de entrada que emula el comportamiento de la actividad cerebral en el marco de sistemas de encefalogramas (EEG).

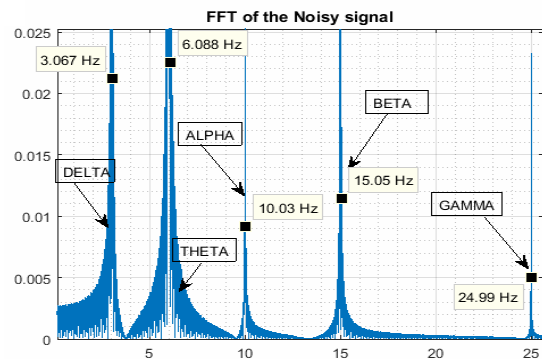


Fig. 7.- Espectro frecuencial de la señal de entrada que emula el comportamiento de la actividad cerebral en el marco de sistemas de encefalogramas (EEG).

Mediante el método de diseño visto anteriormente y presentado a lo largo del artículo, se ha aplicado un filtro digital mediante una ventana de von Hann de orden 402 con la intención de que únicamente queden los armónicos correspondientes a las ondas denominadas ondas *alfa* y *beta* [8].

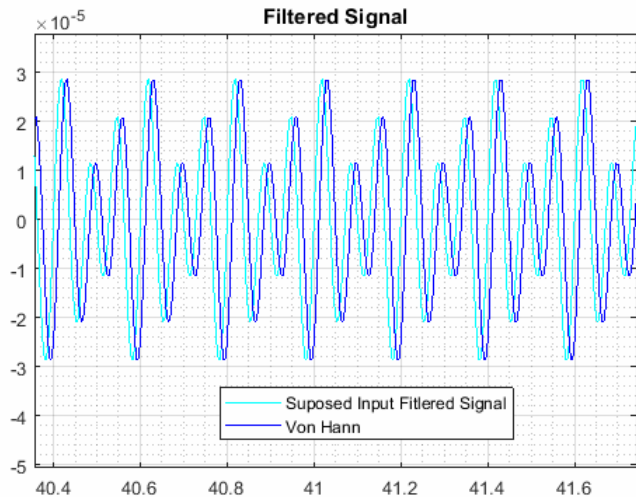


Fig. 8.- Aspecto temporal de la señal filtrada, que contiene las denominadas ondas cerebrales *alfa* y *beta*.

Con el ejemplo anterior se puede observar la alta eficiencia de este tipo de filtros que anteriormente se comentaba ya que son capaces de filtrar entre un rango muy acotado de frecuencias.

VI. CONCLUSIÓN

En este artículo se han presentado los resultados obtenidos en la exploración de herramientas informáticas desarrolladas con diversos programas como son Excel®, Matlab® y Pspice-Orcad®, con el fin de poder llevar a cabo la automatización de procesos de cálculo relacionados con el diseño de circuitos electrónicos analógicos en diferentes áreas de la Ingeniería Electrónica que tanto estudiantes como profesionales deben realizar frecuentemente.

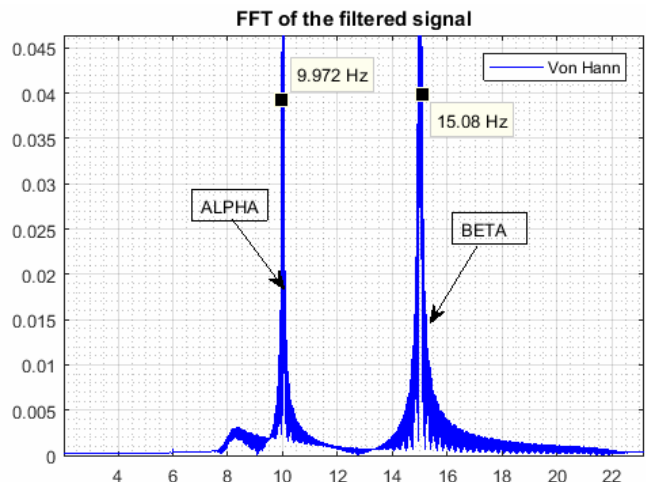


Fig. 9.- Espectro frecuencial de la señal filtrada que contiene las denominadas ondas cerebrales *alfa* y *beta*.

Todas las plantillas aquí presentadas ya se han puesto en práctica realizando diversos circuitos presentando resultados muy satisfactorios, a la vez que se ha disminuido enormemente el tiempo invertido en el cálculo de componentes. Por dichos motivos se ha seguido avanzando en este tipo de aplicaciones ampliando las plantillas presentadas en este artículo, realizando cálculos de etapas transistorizadas, ecualizadores de audio, etc.

Se considera que lo aquí expuesto puede ser de gran ayuda sobre todo para los estudiantes de Ingeniería Electrónica que muchas veces, por la falta de experiencia, se encuentran rediseñando continuamente un circuito invirtiendo tiempo una y otra vez en realizar los mismos cálculos.

REFERENCIAS

- [1] H. Martínez, "Funciones de Aproximación para el Diseño de Filtros Electrónicos," Dept. Ing. Electrónica, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2018.
- [2] H. Martínez, "Utilización de Ábacos para Determinar el Orden de Estructuras de Filtrado," Dept. Ing. Elect., Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2018.
- [3] A. Papoulis, *Sistemas Digitales y Analógicos, Transformadas de Fourier, Estimación Espectral*, 2ª Ed. Barcelona, España: MARCOMBO, S.A., 1986.
- [4] M. Martínez, L. Gómez, A. J. Serrano, J. Vila, J. Gómez, "Diseño de filtros FIR", Dept. Ing. Elect., Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Valencia, Valencia España.
- [5] A. Ambardar, *Procesamiento de señales analógicas y digitales*, 2nda ed. México, D.F: Thomson Learning, 2002.
- [6] R. B. Cuéllar, "Matlab y el diseño de filtros digitales" en *Revista Digital "Investigación y Educación"*, vol. 2, núm. 19, Septiembre 2005.
- [7] J. R. Wolpaw, N. Birbaumer, D. J. Mcfarland, G. Pfurtscheller, and T. M. Vaughan, "Brain-Computer Interfaces for Communication and Control," *Clinical Neurophysiology*, Vol. 113 (nº 6), pp. 767-791, Jun. 2002. [https://doi.org/10.1016/S1388-2457\(02\)00057-3](https://doi.org/10.1016/S1388-2457(02)00057-3).
- [8] Trans Cranial Technologies, "10 / 20 System Positioning.", *Manual*, Version 1.0, pp. 1-20, 2012.