

Práctica 6: Diseño filtros

Bioseñales y sistemas- Bioingeniería

Fabio Velez Osorio
Universidad de Antioquia
Medellín, Colombia
fabio.velezo@udea.edu.co

Resumen

Este trabajo evalúa los filtros digitales FIR e IIR aplicados a señales simuladas y reales, analizando su eficacia para reducir ruido sin alterar la forma original de la señal. Se diseñó una señal sintética afectada por ruido gaussiano y retardo, sobre la que se aplicaron filtros pasa bajas, pasa altas y pasa banda, usando métodos de filtrado como (`lfilter`) y (`filtfilt`). También se procesó una señal biológica, la cual buscaba reducir las interferencias de 60 Hz. El análisis combinó dominios temporal y frecuencial, apoyado en periodogramas de Welch. Los resultados muestran que ambos tipos de filtros funcionan según su tipo de configuración, y el filtrado mejora la fidelidad temporal con las características que se buscan. En conclusión, la elección entre FIR e IIR depende del equilibrio entre la eficiencia computacional y la preservación de la morfología, siendo apropiado para mantener características importantes de la señal.

Palabras clave: Filtros, FIR, IIR, periodograma, Welch.

I. Introducción

El procesamiento digital de señales se ha convertido en una herramienta esencial para el estudio y la modificación de datos. Entre las técnicas más destacadas de este campo se encuentran los filtros digitales, que tienen la función de reducir o suprimir partes indeseadas de una señal, tales como interferencias o determinadas bandas de frecuencia. Dentro de esta categoría, los filtros

de respuesta finita al impulso (FIR) y los de respuesta infinita al impulso (IIR) son de los más empleados, cada uno con características particulares que los hacen más o menos idóneos según la aplicación.

Los filtros FIR poseen una ventaja importante: garantizan estabilidad y pueden diseñarse con fase lineal, evitando así deformaciones temporales en la señal, algo muy relevante cuando es necesario preservar la forma original de la onda, como sucede en el análisis de datos biomédicos[1]. Sin embargo, para lograr transiciones abruptas entre bandas de paso y de rechazo, suelen requerir filtros de orden más alto, lo que implica un mayor esfuerzo computacional. Por el contrario, los filtros IIR, que parten de modelos analógicos, permiten alcanzar resultados similares con órdenes más bajos, reduciendo así la complejidad, aunque pueden provocar desfase y, si no se diseñan correctamente, volverse inestables[1].

El objetivo de este informe es realizar un análisis comparativo entre filtros FIR e IIR aplicados a señales tanto simuladas como reales, observando su desempeño en diferentes escenarios de filtrado. Se busca examinar cómo afectan la forma de la señal, su espectro de frecuencias y la precisión de la información, lo cual, se pretende valorar qué tan eficaces resultan estos filtros para eliminar perturbaciones e interferencias pero manteniendo la estructura de la señal original.

II. Marco teórico

A. Ruido gaussiano

El ruido presente en señales biológicas suele representarse mediante un proceso gaussiano con distribución $N(0, \sigma^2)$, donde σ^2 indica la varianza del ruido. Este tipo de perturbación es de carácter aleatorio, con media igual a cero, asegura que no introduce sesgo, con una varianza definida. En el ámbito digital, este modelo se expresa como $y[n] = x[n] + w[n]$, donde $w[n]$ corresponde al ruido gaussiano y $x[n]$ a la señal original[2]. Generar señales afectadas por este tipo de ruido facilita la evaluación y validación de diferentes algoritmos.

B. Filtros

Se clasifican en dos categorías, filtros de respuesta finita al impulso (FIR) y filtros de respuesta infinita al impulso (IIR).

1. Los filtros FIR:

Se caracterizan por su estructura no recursiva, es decir, no utilizan realimentación. Su función de transferencia contiene únicamente ceros, lo que garantiza estabilidad incondicional y una respuesta en fase lineal, lo que garantiza que todas las componentes frecuenciales de la señal se retrasen la misma cantidad de tiempo. Un filtro FIR se describe por la Ecuación 1 [3].

$$y[n] = \sum_{k=0}^M b_k \cdot x[n - k]$$

Donde:

M : Orden del filtro.

b_k : Coeficientes.

$x[n]$: Señal de entrada.

Ecuación 1. Ecuación general del filtro FIR.

Su diseño suele requerir un orden elevado para lograr transiciones y su comportamiento en fase lo hace ideal para aplicaciones biomédicas.

2. Los filtros IIR:

Emplean una estructura recursiva, es decir, incorporan realimentación. Su función de transferencia incluye tanto ceros como polos, lo que les permite alcanzar especificaciones de filtrado con un orden mucho menor que los FIR. Sin embargo, pueden presentar distorsión de fase y pueden generar inestabilidad. La ecuación 2 muestra el diseño de un filtro IIR.

$$y[n] = \sum_{k=0}^M b_k x[n - k] - \sum_{l=1}^N a_l y[n - l]$$

Donde:

La primera sumatoria acumula las entradas pasadas con b_k y la segunda sumatoria resta las salidas pasadas con a_l

Ecuación 2. Ecuación general del filtro IIR.

Los filtros IIR, como los de tipo Butterworth o Chebyshev, no requieren de tanta carga computacional[4].

C. Tipos filtros

Los filtros pueden clasificarse según las frecuencias que permiten pasar o las que bloquean. Por ejemplo, un filtro pasa bajas atenúa aquellas frecuencias que superan la frecuencia de corte (f_c), mientras que un filtro pasa altas elimina las componentes situadas por debajo de f_c . Los filtros pasa banda, por su parte, dejan pasar solo un rango concreto de frecuencias comprendido entre f_{c1} y f_{c2} , y los filtros Notch (o de rechazo de banda) suprimen una franja muy estrecha de frecuencias centrada en un valor específico, como suele

hacerse para filtrar el ruido de 60 Hz habitual en redes eléctricas [5].

En el diseño digital, es común normalizar las frecuencias con respecto a la frecuencia de Nyquist, definida como $f_{Nyq} = fs/2$, donde fs representa la frecuencia de muestreo. Esta normalización se expresa mediante la Ecuación 3.

$$f_n = \frac{f_c}{f_{Nyq}}$$

Ecuación 3. Normalización de frecuencias.

Las frecuencias de corte pueden describirse como valores proporcionales dentro del intervalo [5].

D. Filtrado

En el procesamiento digital de señales, el diseño y la aplicación de filtros se facilita mediante funciones especializadas incluidas en la biblioteca SciPy, ampliamente utilizada en la comunidad científica e ingenieril. Entre estas funciones destacan: `iirfilter()`, `firwin()`, `filtfilt()` y `lfilter()`, cada una con propósitos y características específicas.

1. La función `iirfilter()` permite diseñar filtros IIR de diferentes tipos, como Butterworth, Chebyshev I y II, y filtros elípticos. La función admite especificar parámetros como la frecuencia o frecuencias de corte normalizadas, el orden del filtro y el tipo de filtro (pasa bajas, pasa altas, pasa banda o notch). Su salida define la función de transferencia del filtro.
2. La función `firwin()` se emplea para diseñar filtros FIR mediante la técnica de ventana, que consiste en truncar la respuesta ideal del filtro multiplicándose por una ventana como Hamming. A diferencia de los filtros IIR, los filtros FIR son estables,

además de poder garantizar una fase lineal. Permite especificar el orden del filtro, la frecuencia o frecuencias de corte normalizadas y el tipo de filtro deseado.

3. La función `lfilter()` aplica dicho filtro a una señal de entrada. Realiza la filtración que retornan coeficientes a y b. Este método puede introducir una distorsión de fase debido a que la salida depende del pasado de la señal.
4. La función `filtfilt()` aplica el mismo filtro dos veces: primero en sentido directo y luego en sentido inverso. Este procedimiento elimina la distorsión de fase, logrando una respuesta en fase cero, aunque a costa de duplicar el orden del filtro. Es especialmente útil para mantener la forma de la señal sin desfase[6].

III. Metodología.

A. Datos

La práctica se divide en dos usos de señales, para la primera parte, se construyó una señal sinusoidal pura $X_e(n)$ con una frecuencia $F_0 = 0.01$ Hz y una frecuencia de muestreo $F_s = 25$ Hz, considerando 1001 muestras. A partir de esta, se simuló una señal biológica contaminada $y_e(n)$, atenuación ($\alpha=0.8$) para simular la pérdida de amplitud al atravesar tejidos. Retardo temporal ($D = 15$ muestras). Ruido gaussiano ($\sigma^2=0.01$) para simular las interferencias aleatorias presentes en ambientes reales. Esta señal sirvió para la aplicación de todos los filtros, garantizando condiciones de comparación.

Para la segunda parte de la práctica se cargó una señal electrofisiológica real de un archivo *senal_filtros.txt* muestreada a 500 Hz solo del canal 1. El análisis a realizar es sobre el periodograma de Welch para identificar componentes frecuenciales, detectando ruido

eléctrico, diseño de filtros FIR e IIR para atenuar el ruido.

B. Filtros

Se diseñaron dos tipos de filtros en dos arquitecturas diferentes, FIR e IIR, con las siguientes frecuencias, utilizamos los datos con la señal creada:

- Pasa bajas: 1.25 Hz
- Pasa altas: 7.5 Hz
- Pasa banda: 1.25 Hz - 7.5 Hz

Filtros FIR:

Se implementaron usando la función `firwin()` usando una ventana de Hamming y un orden de 30.

Filtros IIR:

Se implementaron usando la función `iirfilter()` usando filtro Butterworth y un orden de 8.

C. Filtrado

Utilizando los datos de la señal que se creó, para cada tipo de filtro FIR e IIR se aplicó dos métodos distintos: `lfilter()` y `filtfilt()`. Se representaron gráficamente los resultados del filtrado usando ambos tipos de filtros FIR e IIR en los diseños implementados en solo tipo pasa-bajas, esto permitió observar y comparar visualmente cómo afecta cada técnica al retardo de fase y la atenuación del ruido.

D. Aplicación

Se trabajó con una señal electrofisiológica real, almacenada en el archivo *senal_filtros.txt*, muestreada a 500 Hz. El análisis comprendió las siguientes etapas:

- Aplicación del periodograma de Welch para examinar el contenido espectral de la señal, identificando la presencia de ruido eléctrico a 60 Hz.
- Diseño de filtros tanto FIR e IIR:
Filtro FIR: Orden 181, rechaza-banda

en las frecuencias de corte de 58 Hz a 62 Hz, con ventana de hamming.

Filtro IIR: Orden de 30 y rechazo en la bande de 60 Hz, con la frecuencia de muestreo de 500 Hz.

Asimismo, se generaron representaciones gráficas de las señales filtradas en los dominios del tiempo y la frecuencia, lo que permitió analizar la eficacia del filtrado y contrastar el efecto de aplicar filtros FIR frente a filtros IIR.

IV. Análisis y resultados

A. Creación de la señal

El Gráfico 1 muestra la comparación entre la señal original $x_e(n)$, que presenta una forma senoidal suave, y su versión $y_e(n)$, afectada por atenuación, desplazamiento temporal y la presencia de ruido gaussiano. El retardo de fase y la distorsión provocada por el ruido complican la identificación visual de la forma original de la señal, lo que resalta la importancia de aplicar técnicas de filtrado para recuperar sus características.

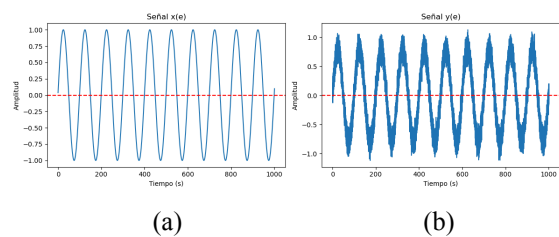


Gráfico 1. (a) Señal $x_e(n)$, (b) Señal $y_e(n)$

B. Filtros

Filtro FIR:

El comportamiento de los filtros FIR, la Gráfica 2 presenta los resultados obtenidos con tres configuraciones distintas (pasa bajas, pasa altas y pasa banda), aplicadas con la función `firwin()` y `filtfilt()`. Se observa que `filtfilt()` elimina el desfase, logrando

conservar la forma y la amplitud original de la señal. Entre las configuraciones evaluadas, el filtro pasa bajas demuestra ser especialmente efectivo para atenuar el ruido, resultando la alternativa más adecuada para reducir las componentes de alta frecuencia sin comprometer la información relevante de la señal. A los filtros pasa-altas y pasa-bandas se les realizó un zoom en el tiempo de 50 segundos para poder ver con más detalle la señal.

Para poder ver mejor las frecuencias, se mostró la respuesta en frecuencia, en este caso solo se muestra la magnitud adimensional para ver esas frecuencias que se están dejando pasar por cada filtro, ver Gráfico 3.

Las frecuencias de corte se normalizaron para cada filtro realizado en la Tabla 1.

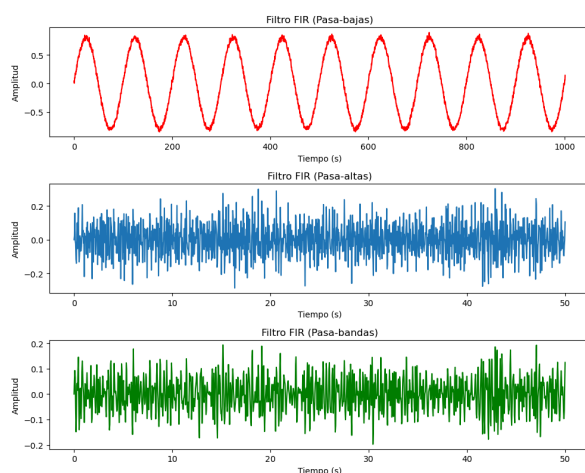
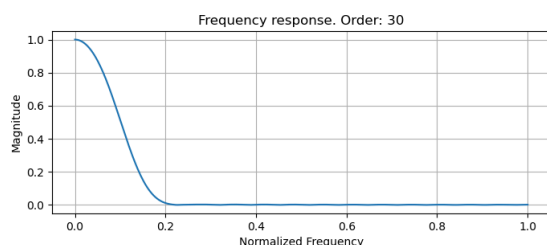
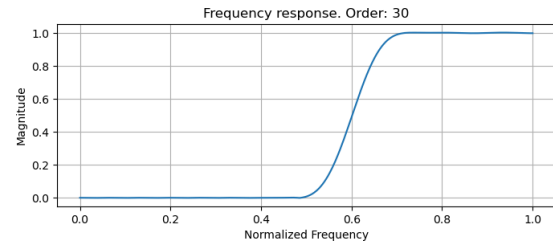


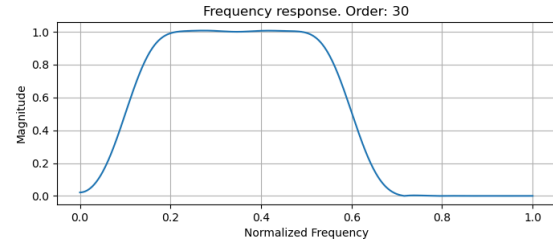
Gráfico 2. Filtrado FIR con la función `firwin()` y `firlfilt()`.



(a)



(b)



(c)

Gráfico 3. Respuesta en frecuencia de magnitud adimensional de filtros FIR. (a) Filtro pasa-bajas, (b) Filtro pasa-altas y (c) Filtro pasa-bandas.

Filtros	Pasa-bajas	Pasa-altas	Pasa-bandas
Frecuencia de corte (Hz)	0.1	0.6	[0.1, 0.6]

Tabla 1. Frecuencias de corte normalizadas para cada filtro.

Lo que evidencia en la respuesta de magnitud adimensional el paso de las frecuencias normalizadas, son las frecuencias correctas por el filtro, lo que nos dice que las señales del Gráfico 2, se validan que están en los rango establecidos.

Filtro IIR:

Los filtros IIR de tipo Butterworth, analizados en el Gráfico 4, se aplicaron las mismas configuraciones en el uso de `iirfilter()` y `filtfilt()`. Corrige el retardo de fase y se evidencia una mayor sensibilidad ante variaciones bruscas de la señal, sobre todo en el rango de frecuencias altas. A pesar de ello, el filtro pasa bajas vuelve a destacar como la opción más eficaz para la reducción del ruido, manteniendo el equilibrio entre atenuación y preservación de la forma original de la señal.

Esto lo podemos ver con la respuesta en la frecuencia con los datos de la Tabla 1, su respuesta se evidencia en el Gráfico 5.

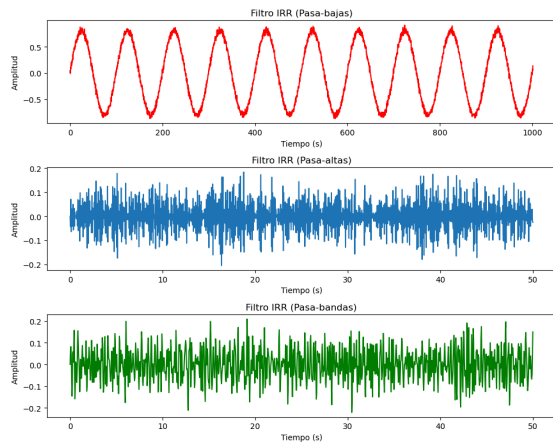


Gráfico 4. Filtrado IIR con la función `firwin()` y `filtfilt()`.

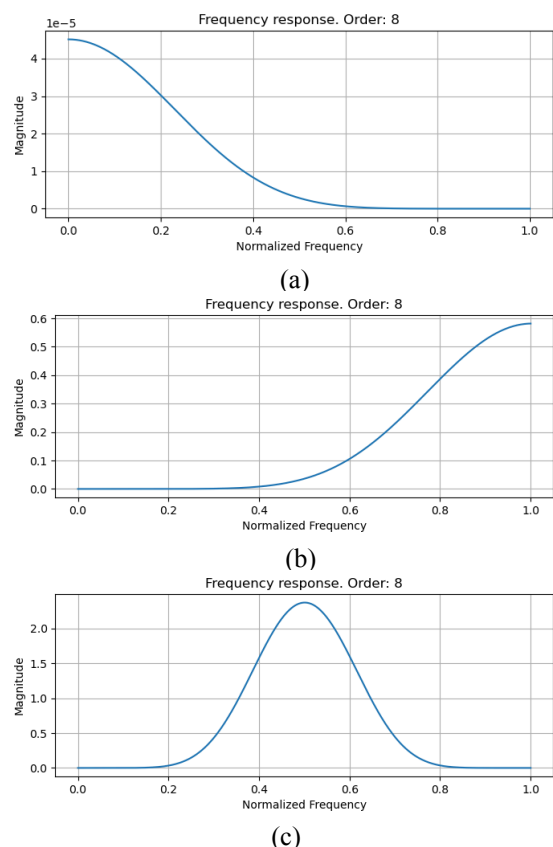


Gráfico 5. Respuesta en frecuencia de magnitud adimensional de filtros IIR. **(a)** Filtro pasa-bajas, **(b)** Filtro pasa-altas y **(c)** Filtro pasa-bandas.

Las respuestas en frecuencia cambian, por ejemplo en el filtro pasa-bandas, presenta un pico más alto o forma de campana porque

logra una transición más rápida y un filtrado más rápido por el orden, pero introduce no linealidad en la fase y resalta ciertas frecuencias. Esto nos muestra como cada filtro cambia en el paso de las frecuencias ciertas características importantes y como su selectividad pueden variar en la señal original.

C. Filtrado

Mostrando la diferencia entre `lfilter()` y `filtfilt()` para los filtros FIR e IIR.

Filtro FIR:

Para el filtro tipo pasa-bajas, se evidencia en el Gráfico 6, donde la diferencia entre ambos usos y un acercamiento de 5 segundos para ver con detalle el comportamiento de las señales.

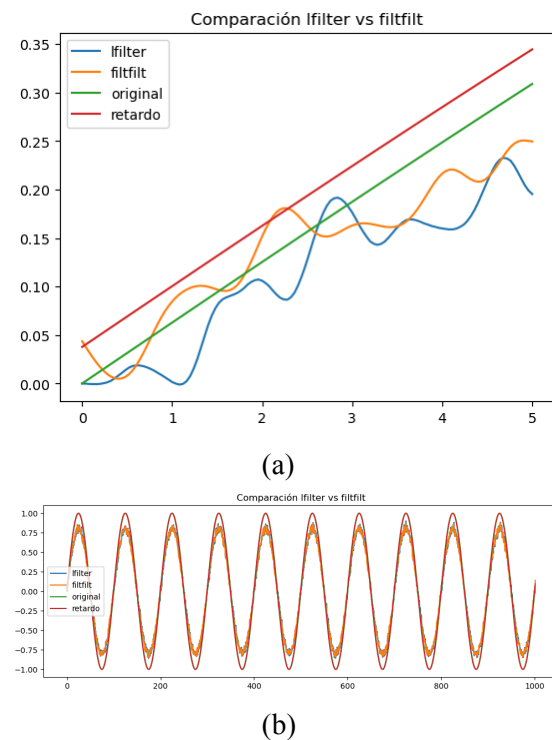


Gráfico 6. Filtrado FIR de tipo pasa-bajas con la función `lfilter()` y `firlfilt()`. **(a)** Señal a 5 segundos y **(b)** Señal completa.

El denominador del sistema es $a = 1$. Esto se debe a que un filtro FIR no tiene parte recursiva ni realimentación; Depende únicamente de las entradas pasadas, ver

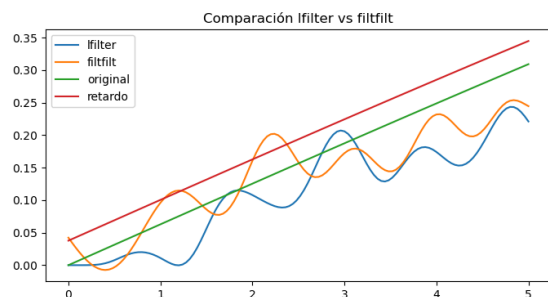
Ecuación 1, multiplicadas por los coeficientes b_k .

Por eso, al implementar el filtrado, basta con usar el vector de coeficientes del numerador. El numerador (b) representa directamente los coeficientes del filtro FIR, que corresponden a la respuesta al impulso del sistema y estos coeficientes determinan cómo se combinan las muestras actuales y pasadas de la señal de entrada para generar la salida filtrada.

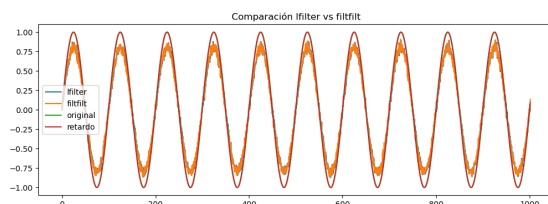
`lfilter()` introduce retardo de fase proporcional al orden del filtro y `filtfilt()` filtra la señal en dos direcciones (adelante y atrás), cancelando el desfase y dejando la señal alineada temporalmente con la original. El orden del filtro tiene como objetivo eliminar componentes de alta frecuencia y mantener la forma general de la señal, por tal motivo el orden es adecuado para este filtro.

Filtro IIR:

Para el filtro tipo pasa-bajas y poder comparar con el filtro FIR, se realizó la misma comparación del uso de `lfilter()` y `filtfilt()` como se ve en el Gráfico 7,



(a)



(b)

Gráfico 7. Filtrado IIR de tipo pasa-bajas con la función `lfilter()` y `filtfilt()`. **(a)** Señal a 5 segundos y **(b)** Señal completa.

En los filtros IIR, la estructura incluye tanto una parte no recursiva (numerador b) como una parte recursiva (denominador a).

- El numerador (b) define la contribución de las muestras actuales y pasadas de la entrada.
- El denominador (a) define la realimentación de las salidas pasadas que también afectan la salida actual..

El orden del filtro IIR en este caso es de 8, el cual define cuántos coeficientes de realimentación y de la parte directa se usan para mayor capacidad de atenuación, pero no un orden muy alto para no introducir más distorsión en fase.

D. Aplicación

Al cargar la señal fisiológica y extraer el canal 1, analizamos el periodograma de Welch para buscar ruido eléctrico en 60 Hz el cual se marcó con una línea roja en el Gráfico 8,

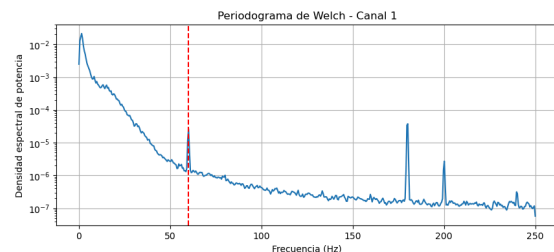


Gráfico 8. Periodograma de welch de señal fisiológica.

Se realizaron filtros IIR y FIR que permitan eliminar el ruido, se diseñaron de la siguiente forma.

Filtro FIR:

Se realizó un filtrado de rechazo de banda, que logró quitar la frecuencia de 60 Hz, como se ve en el Gráfico 9.

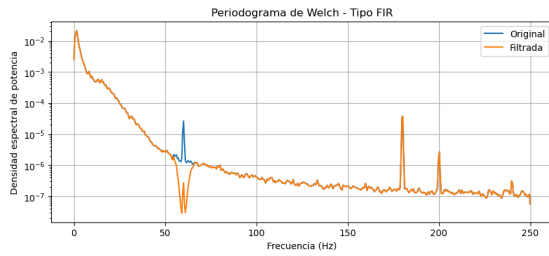


Gráfico 9. Periodograma de welch de señal fisiológica con filtro FIR, antes y después del filtrado.

La energía se redujo en la banda de 58-62 Hz, el resto de la señal, permanece sin cambios porque sólo atenuó en dichas frecuencias. Esto también lo podemos ver en el tiempo como se puede ver en el Gráfico 10, el cual mostramos 3 segundos y como las dos señales coinciden casi por completo, mostrando levemente esa reducción del filtrado de la banda seleccionada.

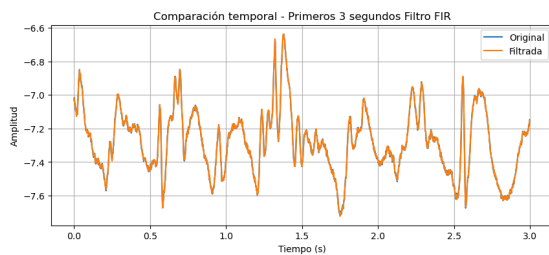


Gráfico 10. Señal fisiológica con filtro FIR, antes y después del filtrado, muestra de 3 segundos.

Filtro IIR:

Se realizó un filtrado de rechazo de banda, que logró quitar la frecuencia de 60 Hz, como se ve en el Gráfico 11.

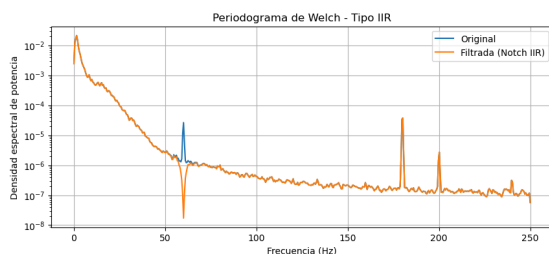


Gráfico 11. Periodograma de welch de señal fisiológica con filtro IIR, antes y después del filtrado.

Al ser un IIR se logró esa banda más estrecha y profunda usando un orden de 30, esta

profunda es debido a la respuesta infinita al impulso, para el filtro FIR necesitaría un orden más alto para poder llegar a estrecharse como el filtro IR, y al tener orden bajo, tiene menos coeficientes.

También lo podemos ver en el tiempo, ver Gráfico 12, el cual mostramos 3 segundos de la señal, e igual que el Filtro FIR al tener menos orden, logra un filtrado limpio en esa banda que se rechazó de 60 Hz.

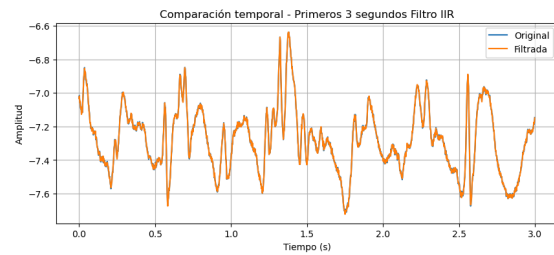


Gráfico 12. Señal fisiológica con filtro IIR, antes y después del filtrado, muestra de 3 segundos.

V. Discusión

El análisis realizado para la elección entre filtros digitales FIR e IIR deben considerarse según la complejidad computacional y la necesidad de preservar la morfología de la señal.

El estudio de Shukl y Singh[7] propone una arquitectura híbrida que integra filtros FIR e IIR para mejorar la calidad de la energía en redes eléctricas fotovoltaicas. Este enfoque permite aprovechar la linealidad de fase característica de los FIR junto con la eficiencia computacional de los IIR, logrando así una reducción significativa de ruidos de la red sin requerir filtros FIR de orden muy elevado. Este tipo de solución resulta particularmente adecuada para sistemas donde el retardo debe ser mínimo y el procesamiento eficiente. Sin embargo, esta estrategia implica una mayor complejidad en el diseño y ajuste, pues requiere balancear cuidadosamente el efecto de cada etapa para evitar inestabilidad y distorsión en la fase.

Por otra parte, el trabajo de Vaidyanathan et al. [8] Se centra exclusivamente en el diseño de filtros IIR con baja sensibilidad frente a errores numéricos en sus coeficientes. Este aporte resulta relevante en implementaciones digitales, especialmente cuando la precisión de los datos es limitada o cuando las plataformas de procesamiento tienen restricciones de memoria y velocidad. Aunque los filtros diseñados mediante este método mantienen las ventajas computacionales de los IIR, persiste la característica de fase no lineal, que puede resultar problemática en aplicaciones donde la alineación temporal y la forma de onda son críticas.

Se resalta que los filtros IIR destacan por su menor orden y eficiencia, mientras que los filtros FIR sobresalen por su respuesta de fase lineal, clave para conservar la morfología de la señal original. Asimismo, ambos estudios destacan la importancia de realizar un diseño correcto para minimizar la sensibilidad y mejorar la estabilidad.

Finalmente, el análisis espectral mediante técnicas como el periodograma de Welch, es importante para identificar frecuencias indeseadas como las de la red de 60 Hz. Esto nos indica que los análisis deben apoyarse no solo en observación temporal, sino también en frecuencia.

VI. Conclusión

La creación de señales afectadas por ruido gaussiano y retardo temporal permitió analizar de manera experimental el rendimiento de distintas configuraciones de filtros digitales. Este procedimiento facilitó comparar, de forma objetiva, aspectos clave como la atenuación del ruido, la alineación temporal y la preservación de la forma de la señal.

Los filtros FIR destacaron por su excelente capacidad para conservar la morfología original. Si bien estos filtros suelen necesitar un orden mayor lo que implica un incremento

en el coste computacional, su fase lineal garantiza que la señal filtrada mantenga la estructura temporal intacta.

Los filtros IIR, aquellos de diseño Butterworth, demostraron ser una opción eficiente en atenuación comparables a los FIR, sobre todo cuando también se usó `filtfilt` para evitar desfases. Sin embargo, al tratarse de filtros recursivos, requieren especial atención para evitar distorsiones de fase, lo que puede ser problemático en aplicaciones sensibles a la exactitud temporal.

Además, el uso del periodograma de Welch fue clave para analizar el espectro de señales reales, permitiendo detectar interferencias como el ruido eléctrico de 60 Hz. Gracias a este análisis, fue posible confirmar no solo la presencia de la perturbación, sino también comprobar la efectividad de los filtros diseñados, observando cómo logran eliminar esa frecuencia específica sin afectar el resto del contenido espectral.

Referencias

- [1] “Tips & Tricks: A cascade of IIR filters with all-pass shaping for near-linear phase,” *IEEE Signal Processing Magazine*, Nov. 2023. [Online]. Available: https://read.nxtbook.com/ieee/signal_processing/signal_processing_nov_2023/tips_tricks.html
- [2] V. Chandrasekar and B. Kannan, “Performance analysis of M-ary modulation over AWGN channel,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 46, no. 10, pp. 1259–1262.
- [3] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, “FIR digital filter design techniques using window functions,” *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, vol. AE-21, no. 6, pp. 506–517
- [4] S. K. Mitra and P. P. Vaidyanathan, “Design of stable recursive digital filters with specified poles and zeros,” *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, vol. AE-23, no. 3, pp. 168–173
- [5] J. H. McClellan, T. W. Parks y B. W. Burrus, “A computer program for designing optimum FIR

linear phase digital filters,” *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, vol. AE-21, no. 6, pp. 506–517

[6] W. Weckesser, “Signal Processing with SciPy: Linear Filters,” en *Proc. SciPy Conference*, 2018.

[7] S. Shukl and S. Singh, “Combined IIR and FIR Filter for Improved Power Quality of PV Interfaced Utility Grid,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 57, no. 5, pp. 5433–5442, Sept.–Oct. 2021, doi: 10.1109/TIA.2021.3087502.

[8] P. P. Vaidyanathan, S. K. Mitra, and V. K. Jain, “A new approach to the realization of low sensitivity IIR digital filters,” *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 34, no. 2, pp. 350–361, Apr. 1986, doi: 10.1109/TASSP.1986.1164843.