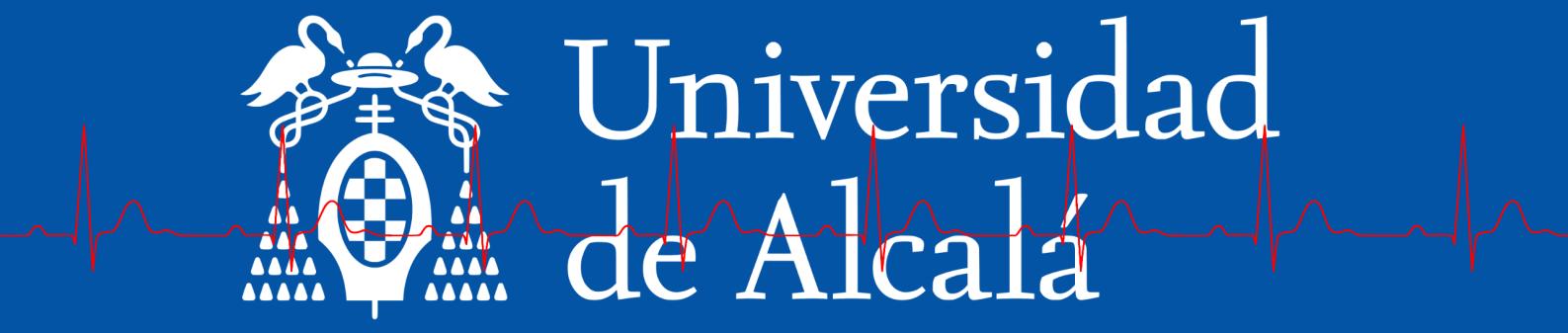

Aplicación de la Transformada Wavelet al filtrado de señales ECG

Juan Casado Ballesteros

UAH - 20 Mayo, 2020

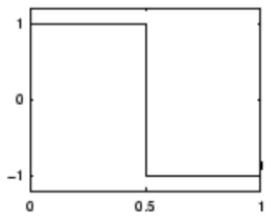


Introducción

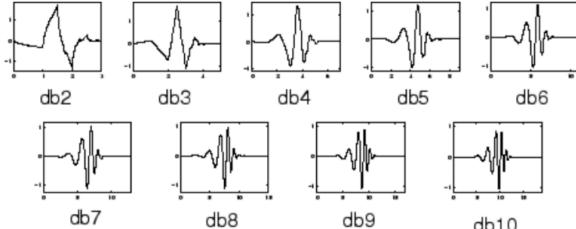
La transformada de Wavelet nos permite extraer intervalos de frecuencia concretos de una señal. Esto se consigue aproximando la señal original por medio de una suma de múltiples señales madre desplazadas y ampliadas o reducidas según corresponda.

Las señales madre son señales finitas. En principio cualquier señal finita podría ser una señal madre, no obstante se suelen utilizar unas ya estudiadas cuyos efectos y utilidad son conocidos. Matlab incluye muchas de estas señales madre:

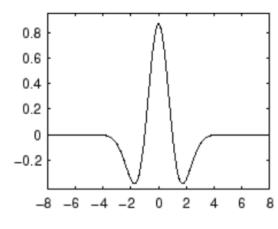
Wavelet Haar.



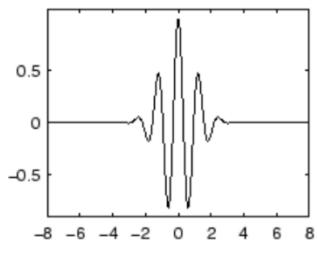
Wavelets Daubechies



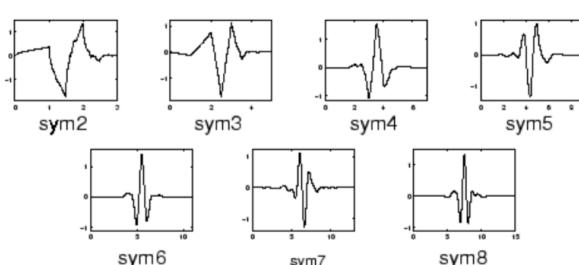
Sombrero mejicano.



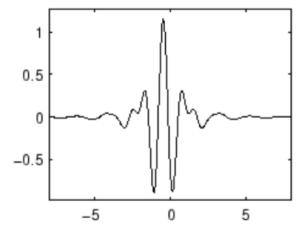
Wavelet Morlet



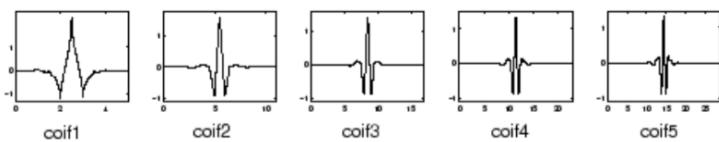
Wavelets Symlets



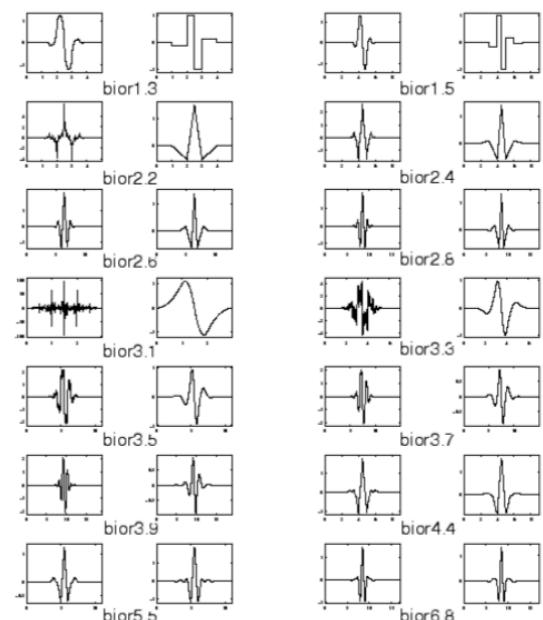
Wavelet Meyer



Wavelets Coiflets



Wavelets Biorthogonal



Normalmente para realizar la transformación del espacio de tiempo al espacio Wavelet y para ir desde el espacio Wavelet al espacio de tiempo (transformadas directa y transformada inversa) se utiliza la misma Wavelet.

En el caso de las Wavelets Biorthogonal esto no es así. Para la transformada directa se utiliza la Wavelet de la izquierda y para la inversa se utiliza la de la derecha.

Cuando apliquemos una Wavelet, transformada directa seguida de transformada inversa habremos separado de la señal original las frecuencias altas de las frecuencias bajas justo desde la mitad de las frecuencias válidas de la señal original según el teorema de Nyquist. Es decir, se una señal capturada a una frecuencia de F Hz tendremos frecuencias válidas hasta $F/2$ Hz por lo que la Wavelet de nivel 1 nos dividirá la señal original en los intervalos $[0, F/4]$ y $[F/4, F/2]$.

Al primer intervalo que comprende las frecuencias más bajas se le llama Aproximación y al segundo que contiene las frecuencias altas se le llama Detalle.

La Wavelet de un nivel se crea a partir de la Aproximación del nivel anterior creando un nuevo detalle y una nueva aproximación. De este modo podemos calcular los intervalos de las aproximaciones como $[0, F/2^{(n+1)}]$ y los de los detalles como $[F/2^{(n+1)}, F/2^n]$ con n el nivel que estamos calculando.

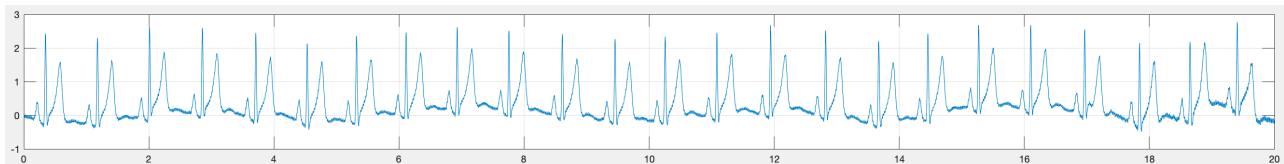
Para los 10 primeros niveles y una frecuencia de sampleo de 500Hz tendríamos los siguientes valores de los rangos de las aproximaciones y los detalles:

A1: [0, 125];	D1: [125, 250]
A2: [0, 62.5];	D2: [62.5, 125]
A3: [0, 31.25];	D3: [31.25, 62.5]
A4: [0, 15.625];	D4: [15.625, 31.25]
A5: [0, 7.8125];	D5: [7.8125, 15.625]
A6: [0, 3.9062];	D6: [3.9062, 7.8125]
A7: [0, 1.9531];	D7: [1.9531, 3.9062]
A8: [0, 0.97656];	D8: [0.97656, 1.9531]
A9: [0, 0.48828];	D9: [0.48828, 0.97656]
A10: [0, 0.24414];	D10: [0.24414, 0.48828]

Idealmente las aproximaciones y los detalles calculados tienen la propiedad de que no se pierde información al calcularlos. Es decir, podríamos dividir la señal en tantos niveles como quisieramos que si sumáramos todos los detalles y la última aproximación calculadas obtendríamos de nuevo la señal original.

Filtrado de la linea basal

Partimos de un ECG cuya línea base es irregular. Esto se debe a que la señal contiene ruido de baja frecuencia.



A priori podemos saber que la frecuencia de dicho ruido estará entorno a 1Hz, de otro modo esto estaría distorsionando al ECG de otra forma y no afectaría tan claramente a su línea base.

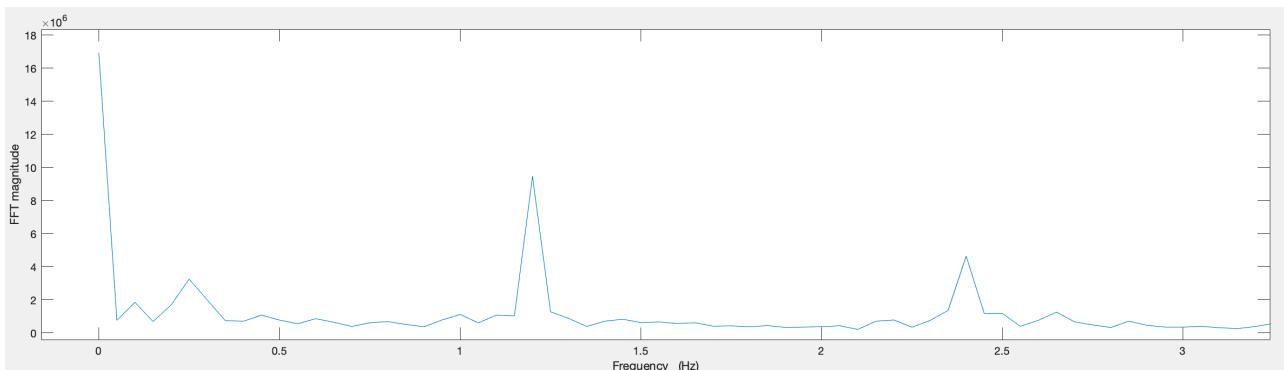
Partiendo de esto y tras inspeccionar el código de **lineabase.m** podemos saber que los valores candidatos para la variable nivel (tercer parámetro de la función) son 8, 9 y 10.

La función **lineabase** calcula el aspecto de orden nivel y se lo resta a la señal original. Los aspectos indicados contendrán las siguientes frecuencias:

- Aspecto 8: [0, 0.97656]
- Aspecto 9: [0, 0.48828]
- Aspecto 10: [0, 0.24414]

El aspecto 7 tendría frecuencias entre [0,1.9531] lo cual eliminaría frecuencias demasiado altas lo que distorsionaría el ECG y nos haría perder información y el aspecto 11 tendría frecuencias entre [0,0.12207] que son demasiado bajas.

Antes de proceder a aplicar la función utilizamos **ffPlot**, función ya usada en la práctica anterior para ver el espectro de frecuencias en la señal.

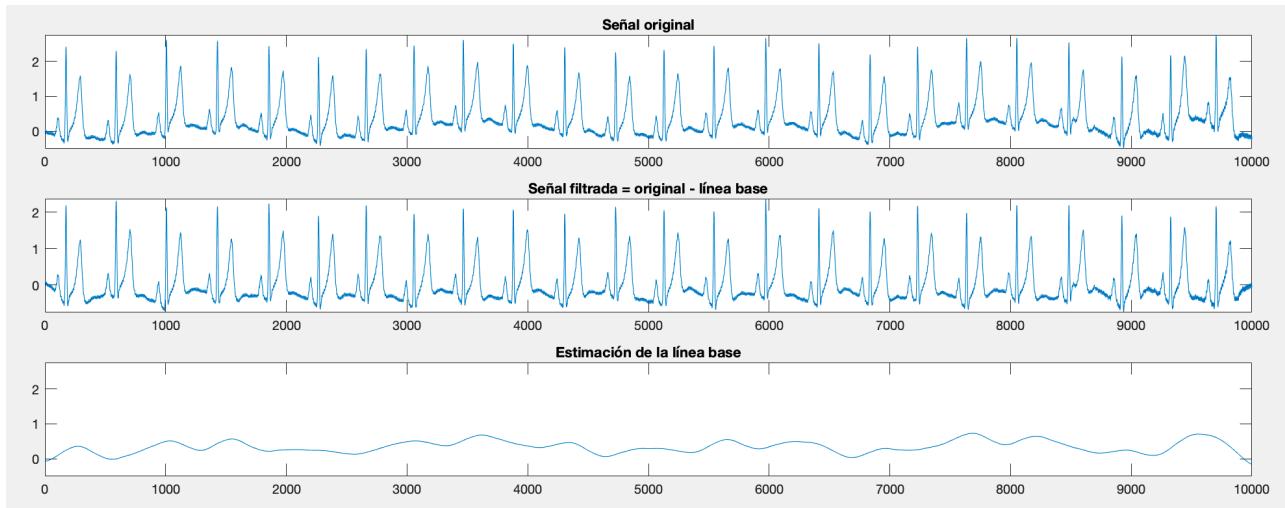


Podemos ver un gran pico de bajas frecuencias próximo a 0 y otro próximo a 0.25 Hz que sin duda son los causantes de las irregularidades en la línea base.

Aplicamos a continuación e filtro de Wavelet y exploramos los resultados.

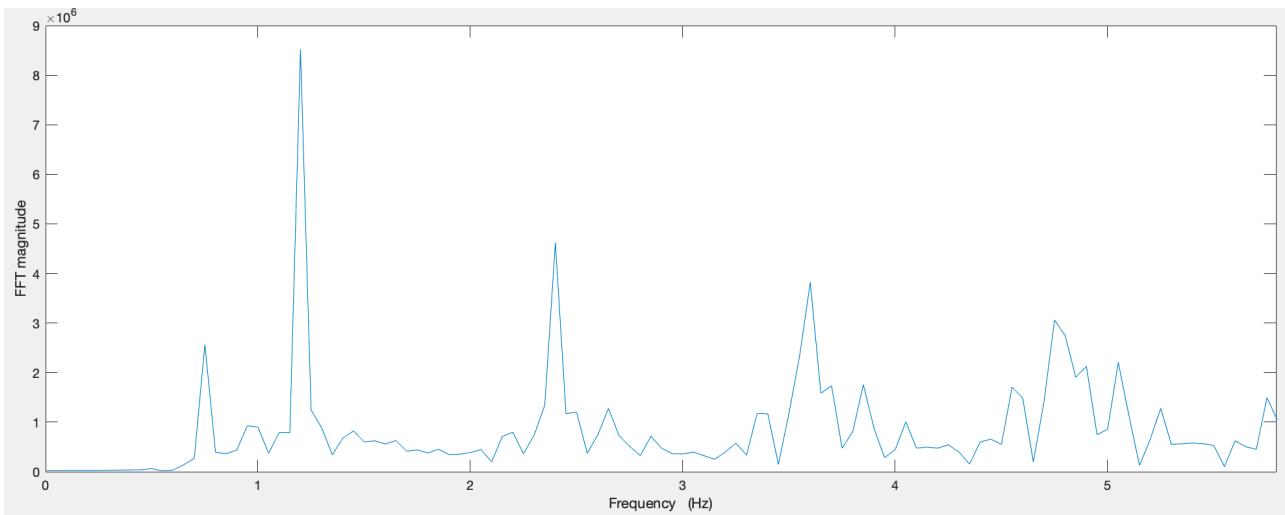
Wavelet nivel 8

Aplicando un filtro de nivel 8 en el que eliminamos las frecuencias hasta 0.97656 Hz podemos ver que logramos corregir las irregularidades en la línea base.



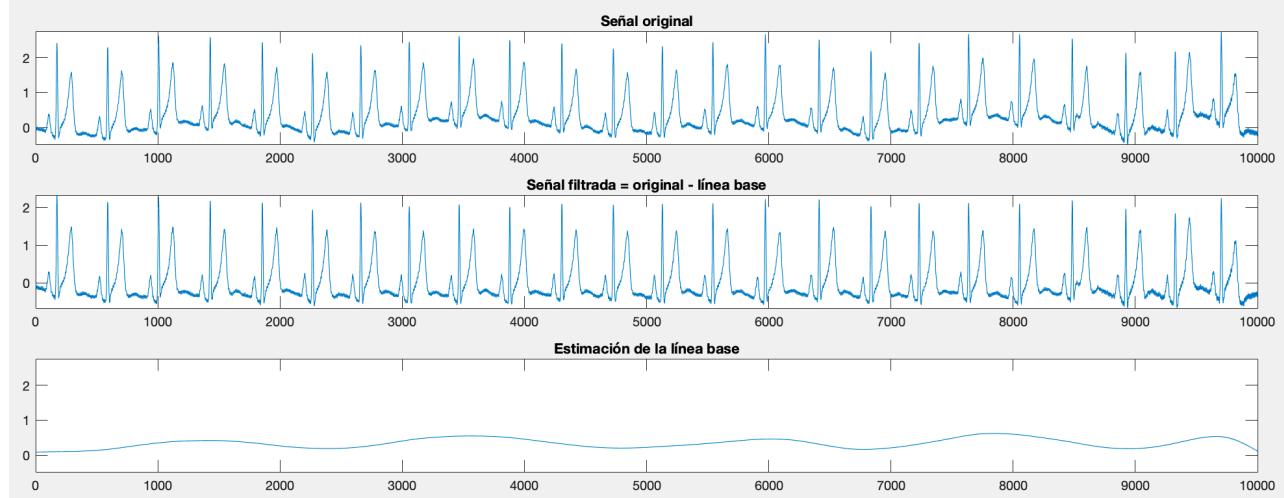
No obstante en la señal de **Estimación de la línea base** podemos ver que algunas de las oscilaciones tienen cierta regularidad con los picos del ECG de modo que pudiera ser que en este filtrado estemos eliminando información relevante en las bajas frecuencias de ECG aunque esta sería mínima.

En la FFT podemos ver como los dos picos de ruido que mencionamos anteriormente han desaparecido.

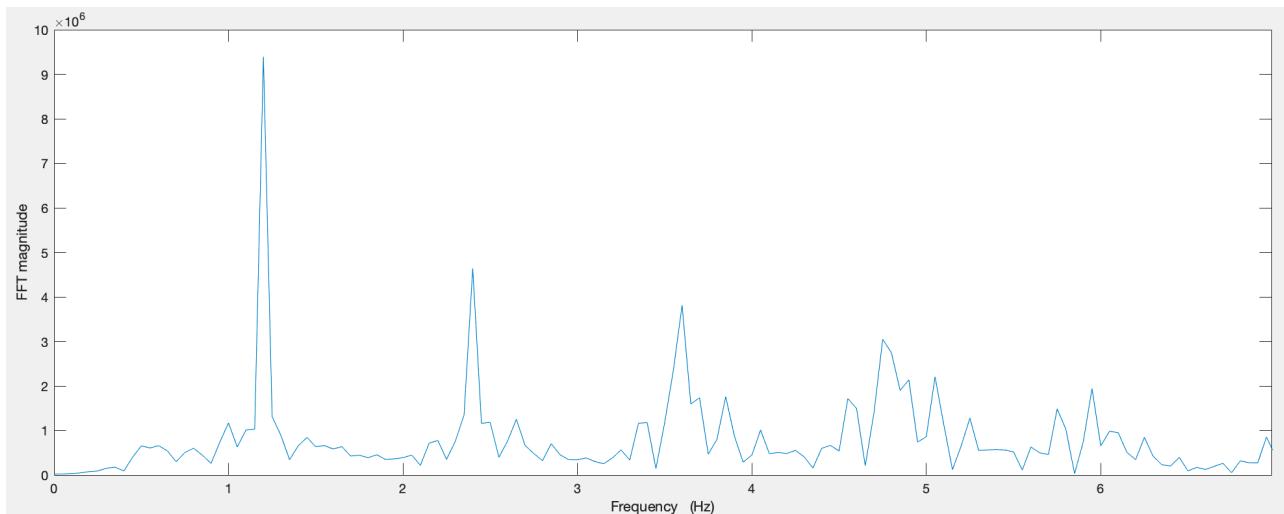


Wavelet nivel 9

Aplicando un filtro de nivel 9 en el que eliminamos las frecuencias hasta 0.48828 Hz podemos ver que también logramos corregir las irregularidades en la línea base.

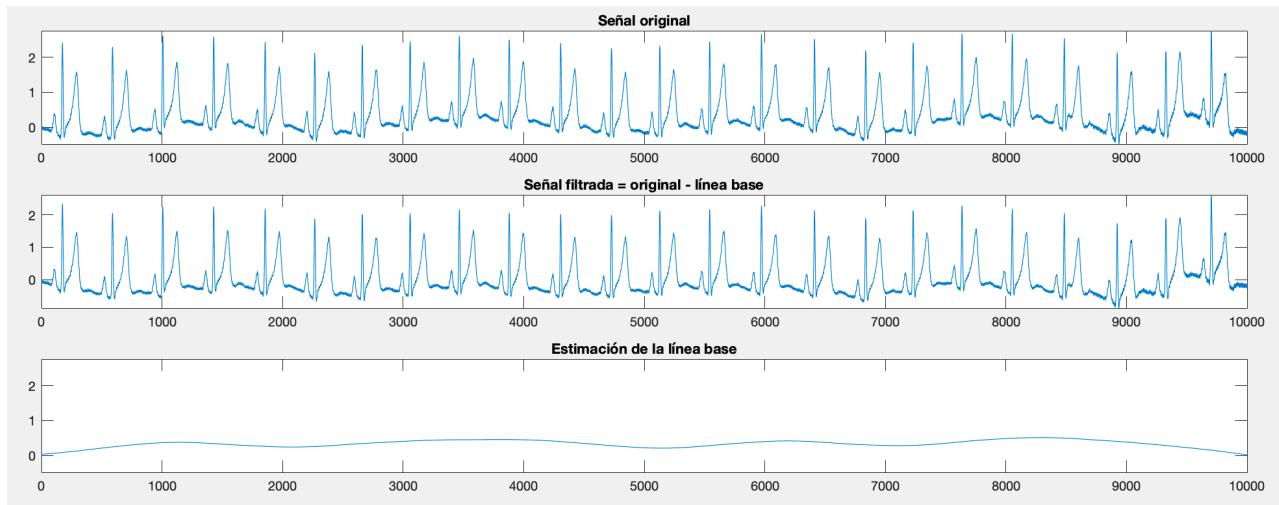


En este caso no nos queda ninguna duda de que todo aquello que hemos eliminado de la señal era ruido. Incluso pudiera ser que hubiéramos dejado algo, pues todavía quedan algunas frecuencias demasiado bajas en la FFT.

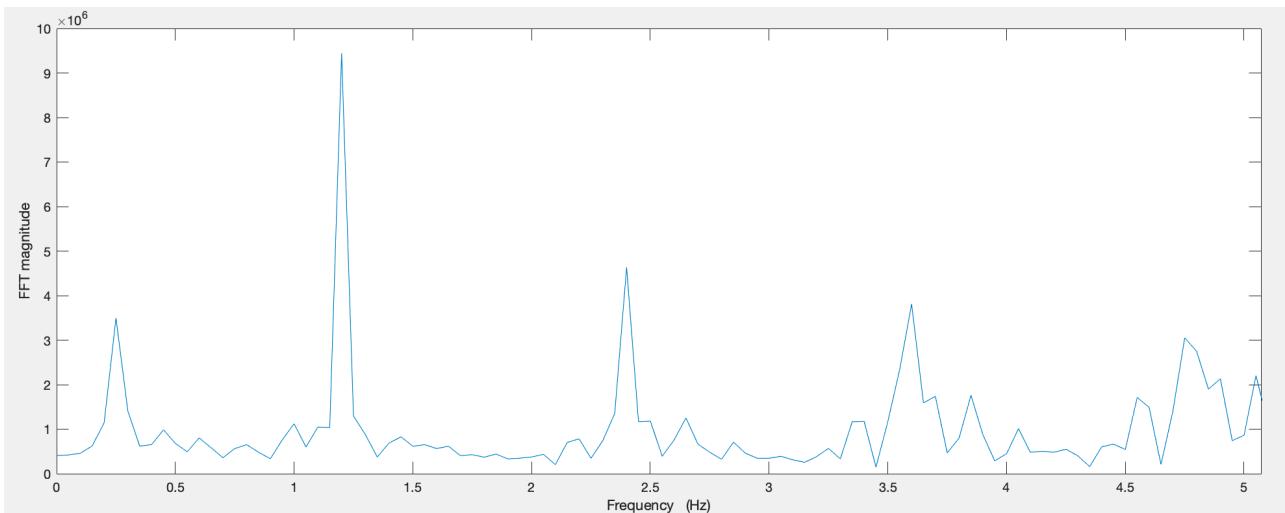


Wavelet nivel 10

Aplicando un filtro de nivel 10 en el que eliminamos las frecuencias hasta 0.24414 Hz podemos ver que no llegamos a corregir plenamente las irregularidades en la línea base.



Podemos ver claramente como queda todavía ruido de baja frecuencia que deberíamos estar eliminando y hemos dejado pasar. En el final del ECG, es muy apreciable.

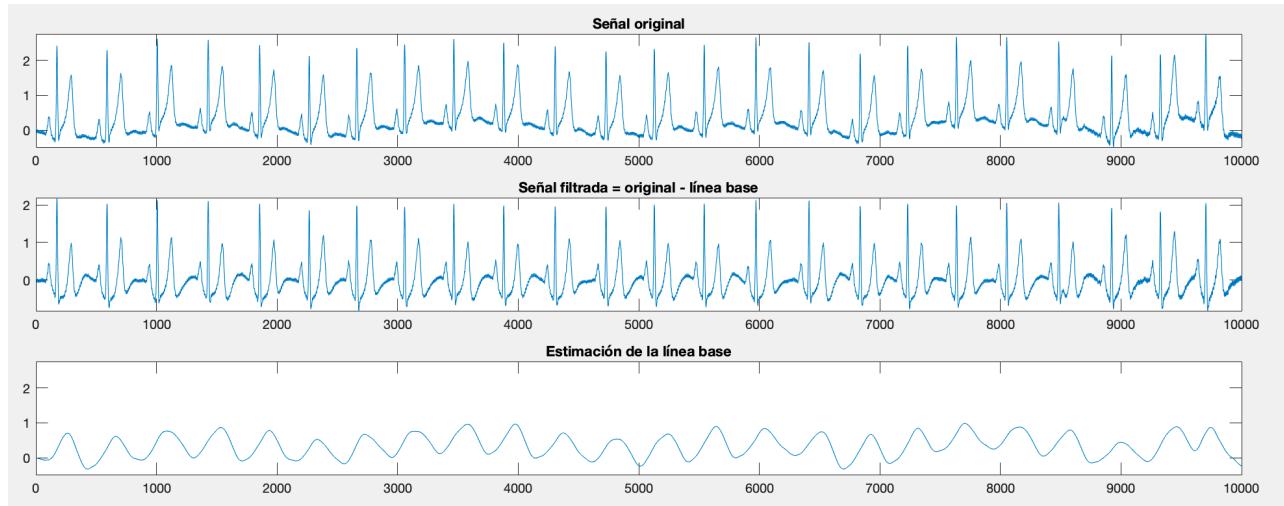


La FFT nos reafirma en la observaciones realizadas, el pico de ruido entorno a los 0.25 Hz se nos ha colado y deberíamos de haberlo eliminado.

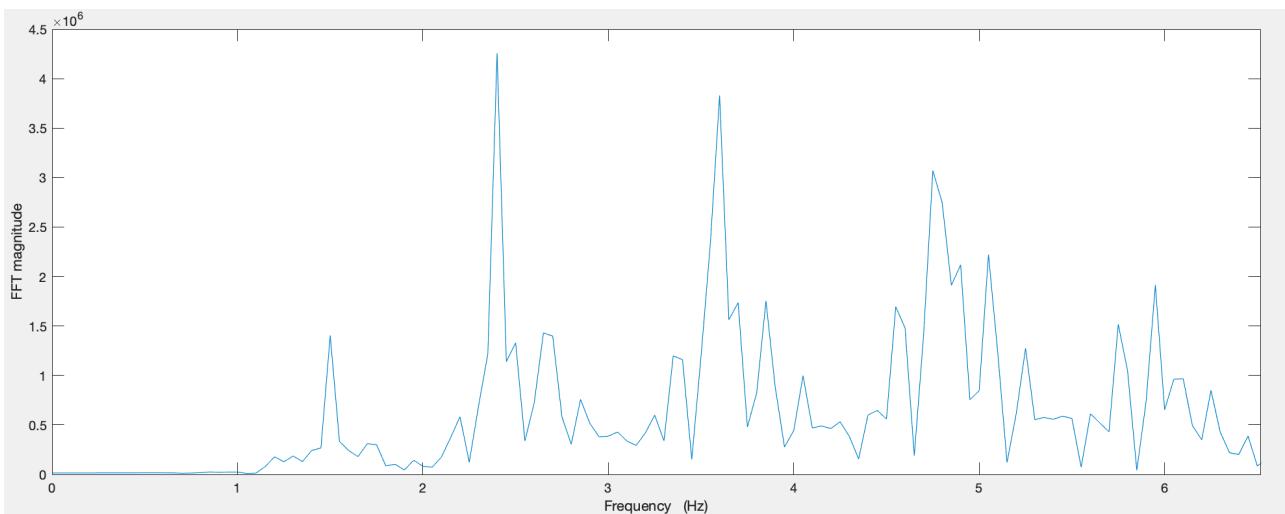
Aunque inicialmente contemplamos este filtro como uno de los posibles candidatos para filtrar la señal finalmente descubrimos que nos es un filtro válido, deja pasar ruido de demasiada baja frecuencia.

Wavelet nivel 7

Como contraste con las Wavelet de niveles 8 y 9, ambas filtros válidos exponemos lo que sucedería al aplicar la de nivel 7 la cual elimina frecuencias de hasta 1.9531Hz.



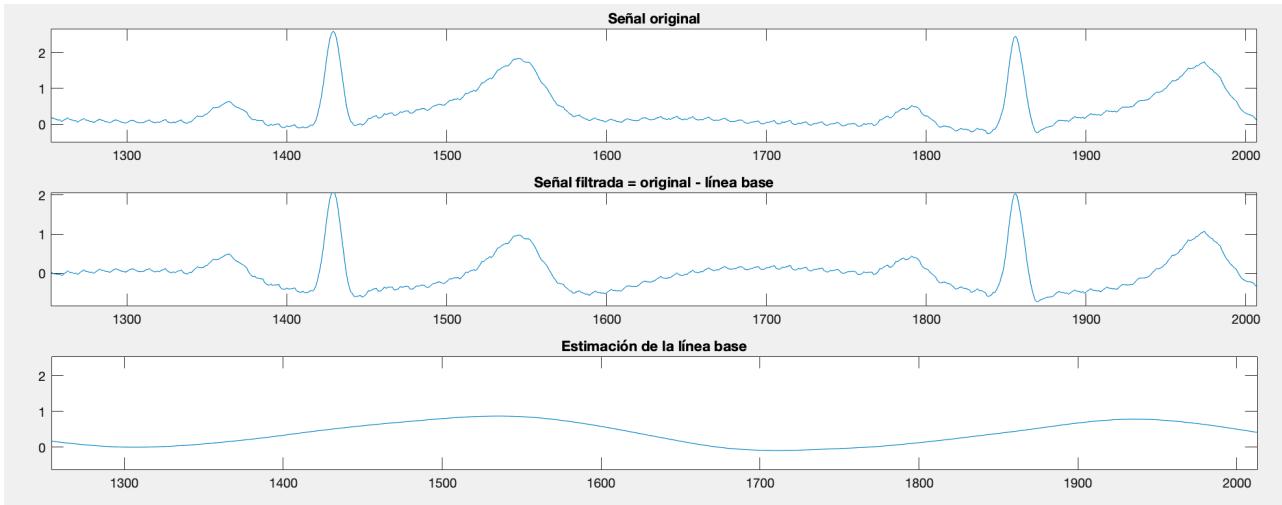
A simple vista no parece que haya sucedido nada especialmente grave, no obstante si nos centramos en el espacio entre las ondas T y P ha aparecido una distorsión resultado de nuestro filtrado. Tal y como podemos ver en la señal que estamos restando **Estimación de la línea base**, estamos eliminando información con frecuencia similar al del latido cardíaco, lo cual nos indica que estamos eliminando información relevante perteneciente al ECG.



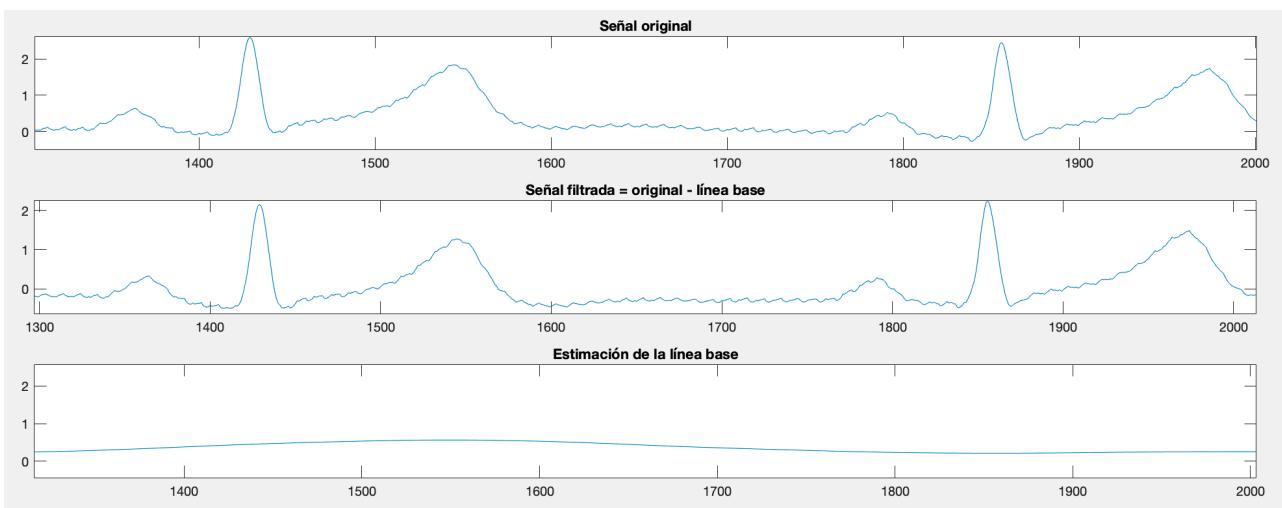
En la FFT confirmamos esto, hemos eliminado un pico de frecuencias entorno a 1 Hz que sí pertenecía al ECG y que no deberíamos haber eliminado.

Haciendo zoom sobre el ECG podemos ver que hemos distorsionado gravemente la señal cosa que no pasaba en el caso de utilizar la Wavelet de nivel 8 que también mostramos como ejemplo.

Zoom sobre ECG con Wavelet nivel 7, el ECG ha sido distorsionado por el filtro.



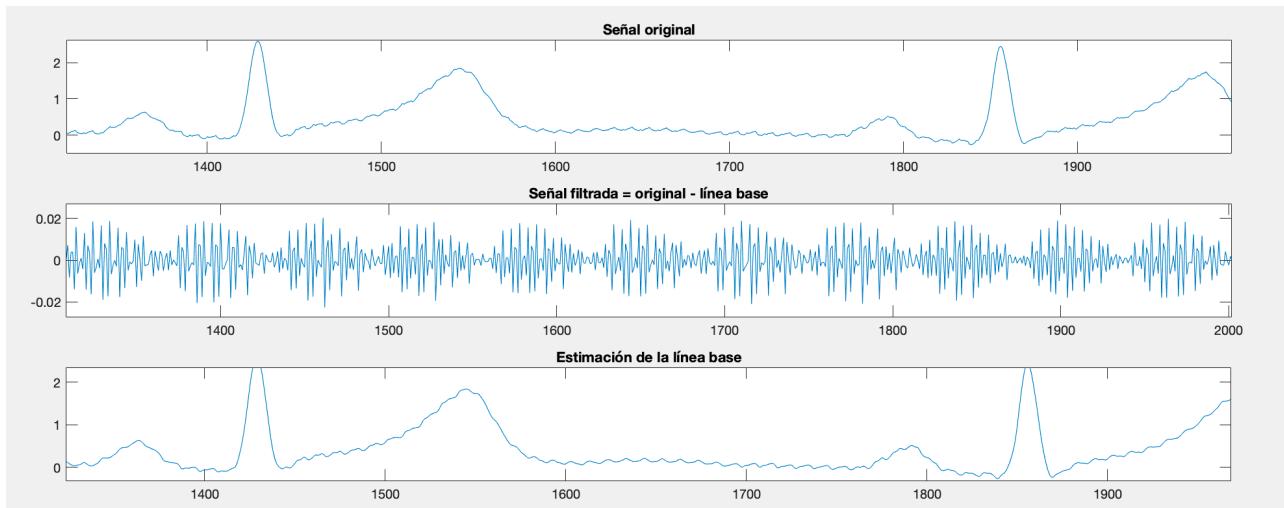
Zoom sobre ECG con Wavelet nivel 8, el filtro no llega a distorsionar al ECG.



Wavelet nivel 1

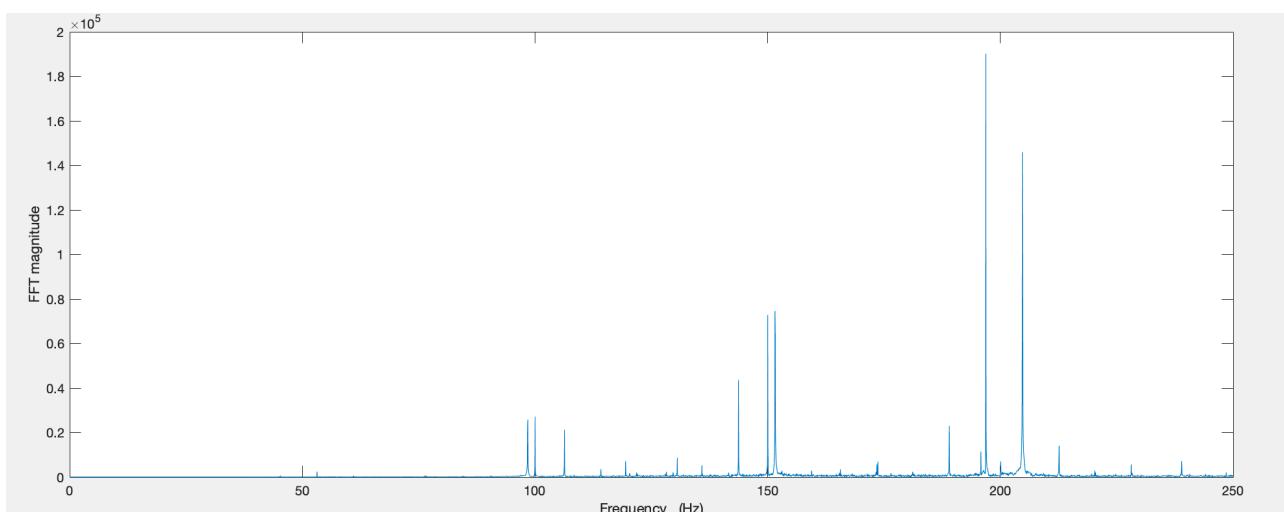
Aplicando una Wavelet de nivel inferior, nivel 1 en este caso aunque resultado similares se obtienen con la de nivel 2 podemos eliminar el ruido de alta frecuencia. En este caso el resultado de la señal filtrada se nos mostrará en la gráfica inferior en lugar de en la gráfica de en medio.

En la gráfica inferior, correspondiente con el Aspecto1, tendremos las frecuencias entre [0 y 125] de la señal, es decir, estaremos eliminando el ruido de alta frecuencia de ECG. Podemos ver que la señal obtenida es ligeramente más suave que la original.



La salida en este caso en **Estimación de la Línea base** y el ruido eliminado es **Señal filtrada**.

En la FFT estaremos viendo las frecuencias que hemos eliminado y no las que se quedan como en los casos anteriores. Podemos ver que hemos eliminado en su mayoría frecuencias no pertenecientes al ECG.



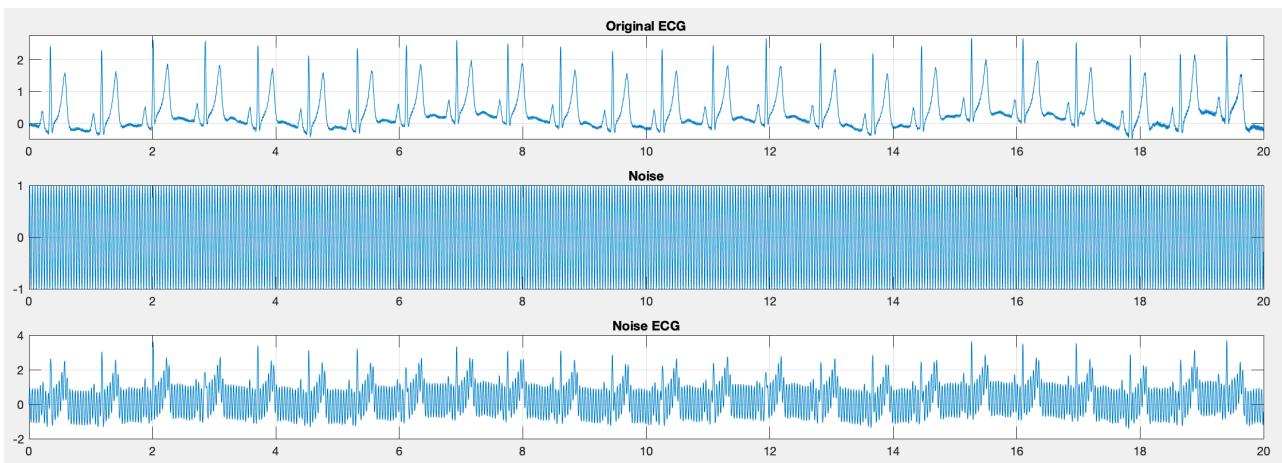
Suma de interferencia en forma de tono y posterior eliminación de la misma

Añadiremos ruido a la señal ECG mediante una senoidal de 23 Hz.

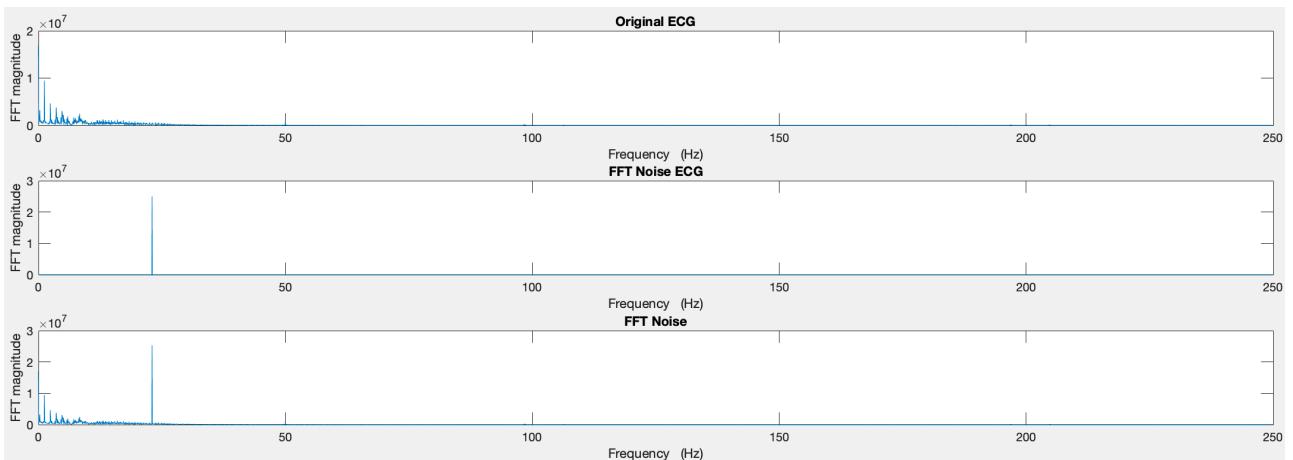
```
sampling_rate = 500;  
sampling_period = 1/sampling_rate;  
elapsed_time=sampling_period*(length(ecg500)-1);  
time_vector = 0:sampling_period:elapsed_time;  
  
noise_frequency = 23;  
noise = sin(2*pi*noise_frequency*time_vector)';  
noise_ecg = noise + ecg500;
```

% Hertz
% Seconds

Podemos ver el ECG original, el ruido aplicado y la señal resultante.

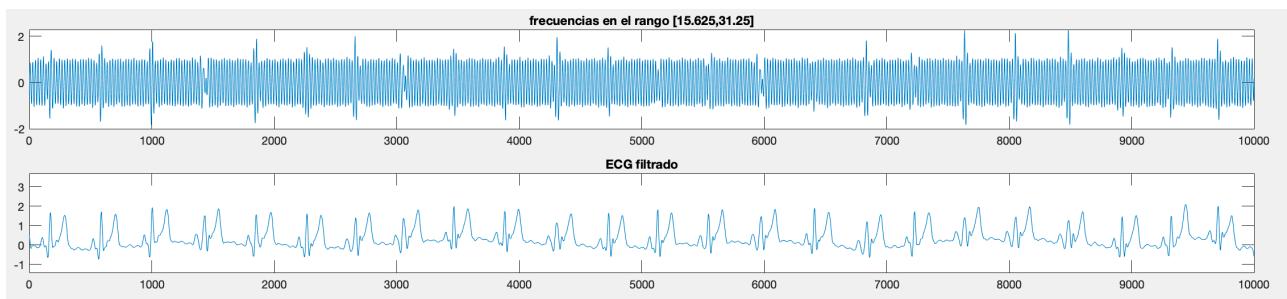


También las FFT de estas señales dónde destaca el pico a 23Hz causado por el ruido introducido.



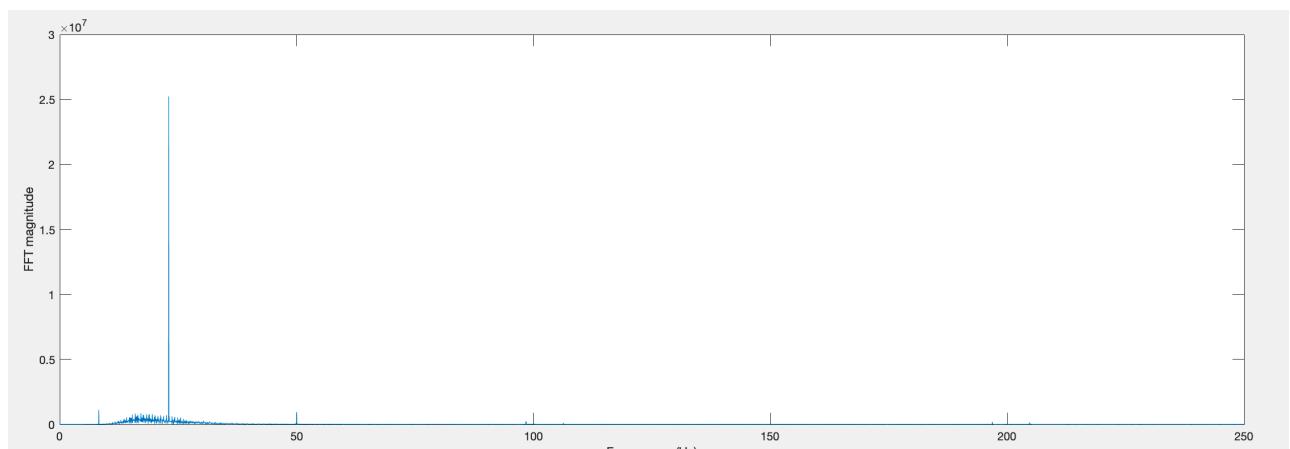
Ahora podremos eliminar este ruido utilizando filtrado mediante Wavelets. El tono de 23Hz lo podemos encontrar en el detalle 4 que contiene frecuencias en el rango [15.625,31.25]. $[500/2^{(4+1)}, 500/2^4]$.

Eliminando este detalle de la señal original eliminaremos el ruido así como el resto de información contenida en esas frecuencias.

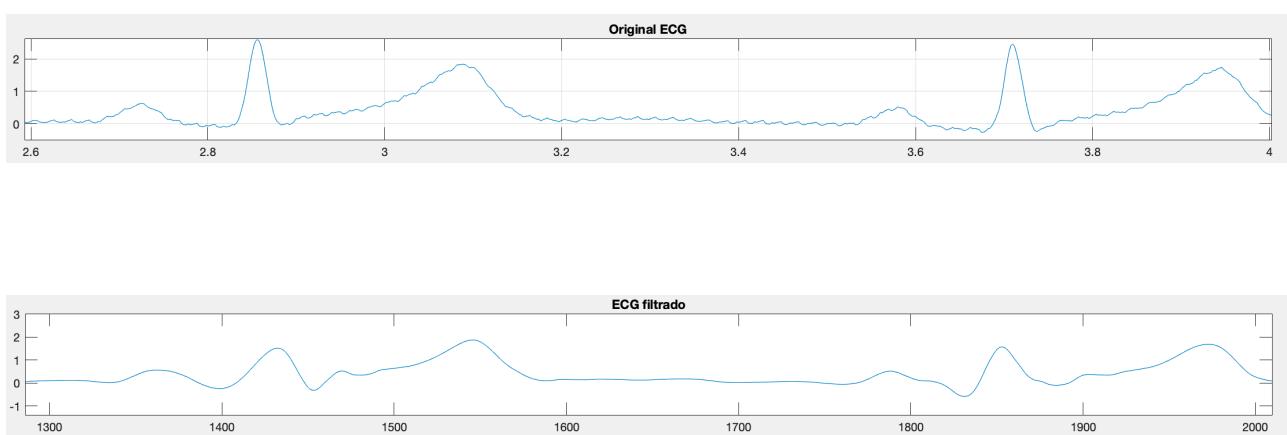


Con el detalle de nivel 4 estaremos las frecuencias de rango. Restando estas frecuencias eliminamos el ruido de la señal.

En la FFT vemos que eliminamos todo el ruido de 23Hz aunque también el resto de frecuencias del rango.



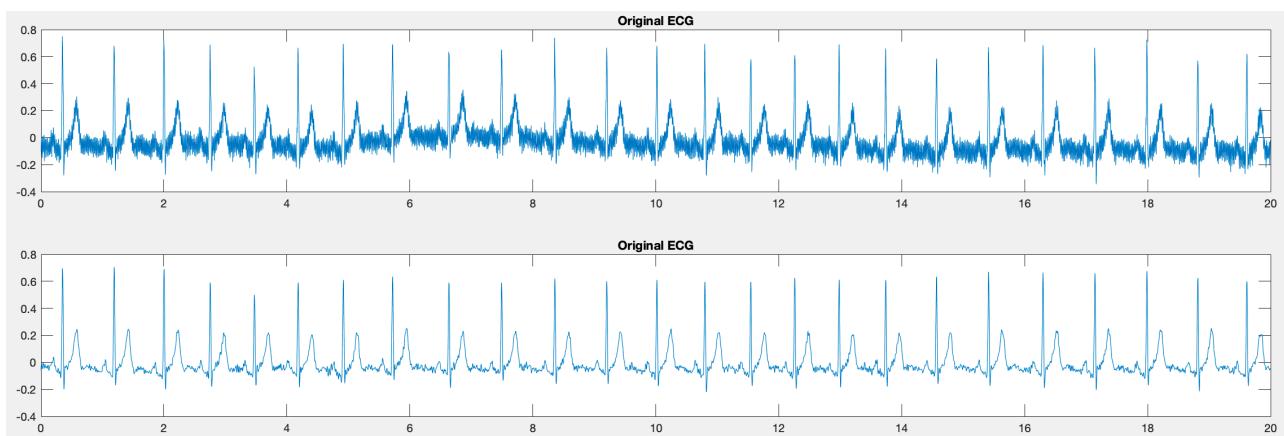
El ECG se verá ligeramente distorsionado a causa de esto.



Detección de puntos característicos en los registros ECG por medio de la Transformada Wavelet

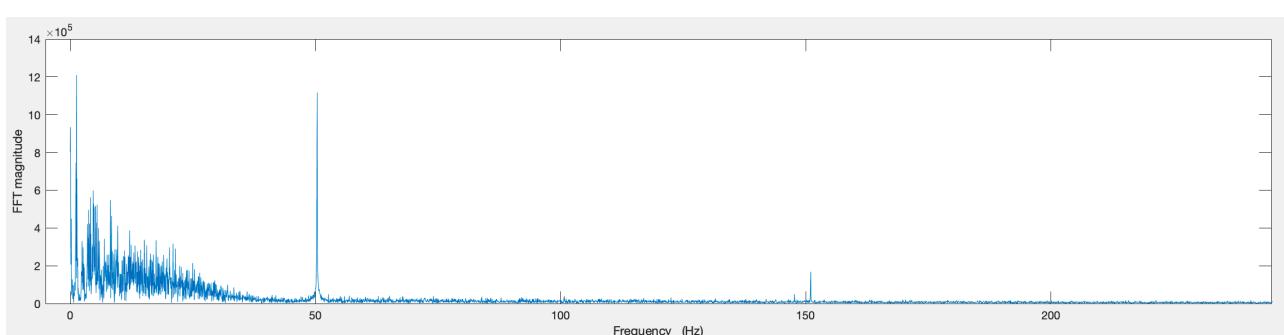
En esta sección utilizaremos la transformada Wavelet para detectar las ondas características del ECG, en concreto la onda P, el complejo QRS y la onda T. Omitiremos la detección de la onda U pues normalmente no llega a ser capturada.

Se utilizará un registro real de un ECG obtenido de physionet. El registro elegido pertenece a la base de datos ECG-ID. En concreto utilizaremos el registro 2. La ventaja de los registros de esta base de datos es que incluyen tanto el registro original como uno ya filtrado y listo para usarse de modo que podremos evitar realizar ese paso previo.

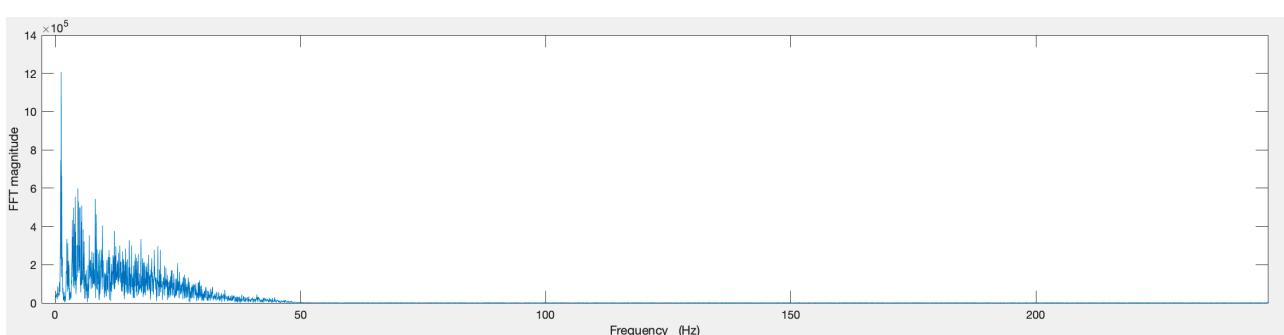


A simple vista podemos ver que de una señal a otra se ha eliminado el ruido de baja frecuencia pues la línea base en la señal filtrada es plana y también el de alta frecuencia pues han desaparecido las ondulaciones constantes a lo largo de la señal.

Explorando la FFT de ambos registros podemos ver que adicionalmente el ruido de 50Hz ha sido eliminado.



En el ECG filtrado no aparecen el pico de frecuencias en los 50Hz, el pico de frecuencias por debajo de 1Hz ni tampoco las frecuencias altas.



Análisis Wavelet sobre señal filtrada

Para facilitar la detección de las ondas en el ecg se implementa la siguiente función:

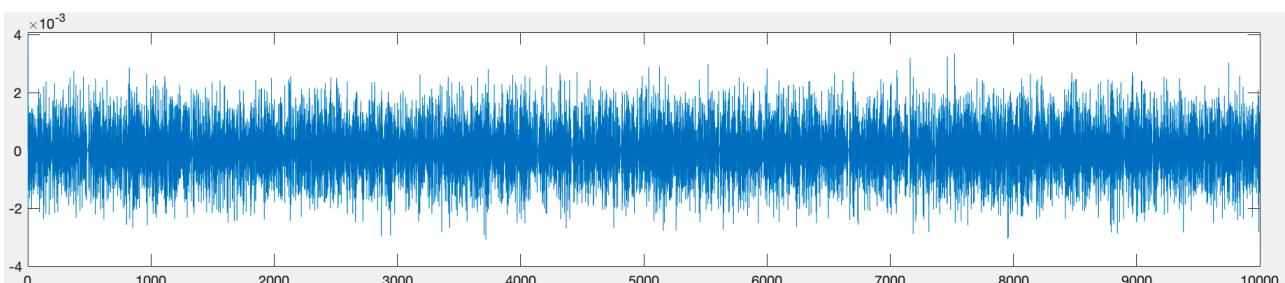
```
function [detalle,aproxim] = wavelet(origen,wave,nivel)
[C,L]=wavedec(origen,nivel,wave);
aproxim=wrcoef('a',C,L,wave,nivel);
detalle=wrcoef('d',C,L,wave,nivel);
end
```

Esta función calcula el detalle y la aproximación de un nivel determinado para una Wavelet concreta.

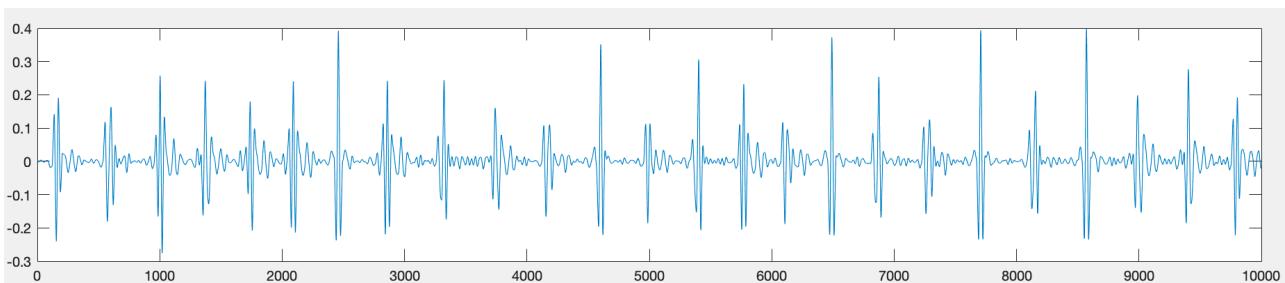
Detección del QRS

El QRS es el complejo de mayor frecuencia del ECG. Podemos detectar estas tres ondas buscando en las altas frecuencias del ECG.

Vemos que en el detalle 1 solo tenemos ruido:



Y que en el detalle 5 comienzan a aparecer frecuencias pertenecientes a la onda T que pueden verse tras el QRS.

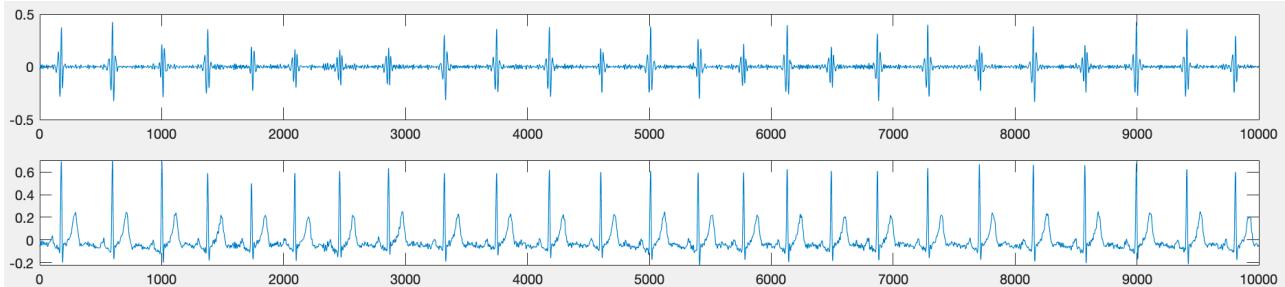


De modo que concluimos que las frecuencias pertenecientes al QRS se encuentran en los detalles 2, 3 y 4. Estas frecuencias se corresponden con el rango [15.625, 125]Hz

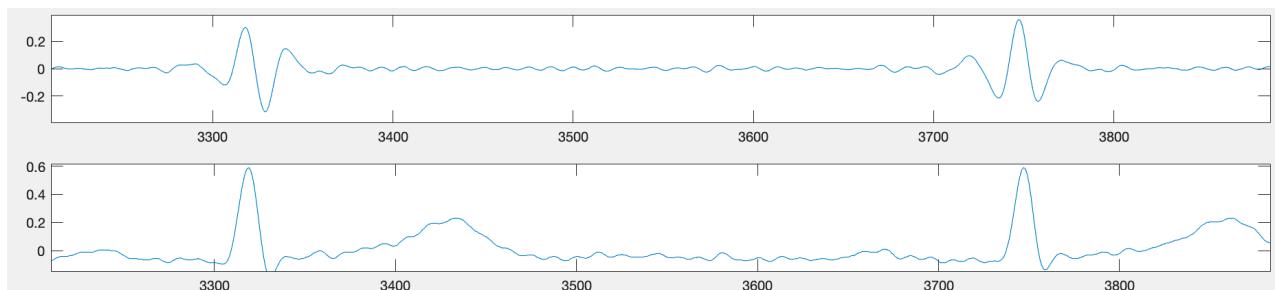
Podemos aislar este rango de la siguiente forma:

```
[detalle1,aprox1]=wavelet(ecg, 'coif3', 1);
[detalle4,aprox4]=wavelet(ecg, 'coif3', 4);
QRS=(ecg-aprox4)-detalle1;
```

Se está utilizando la Wavelet **coif3** pues su forma es la que más se asemeja al QRS.



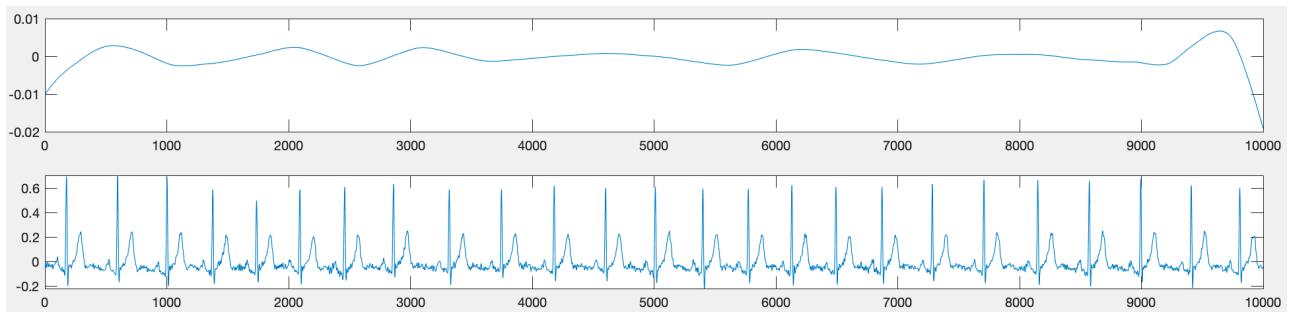
Podemos ver que en la señal obtenida aparece un pico claro cada vez que se produce un QRS aunque la forma de ambos no coincide exactamente. El resto de ondas de ECG no aparecen.



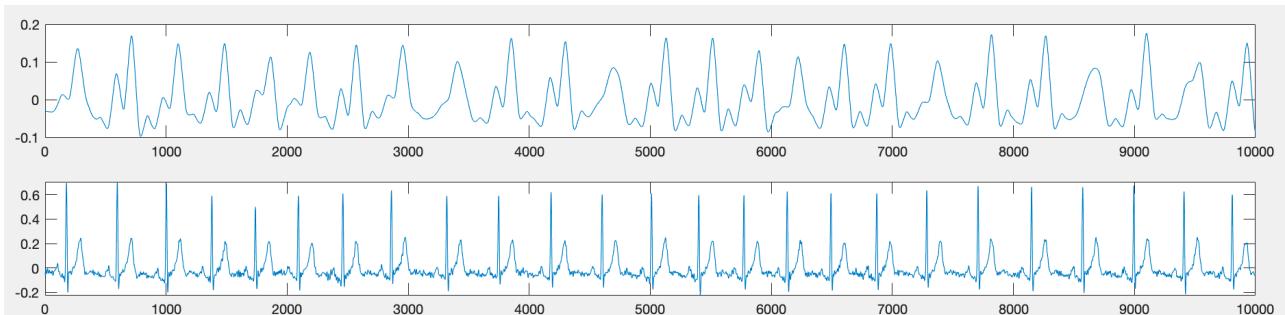
Detección de la onda T

La onda T Tiene una frecuencia mayor que el resto de ondas del ECG. De modo que deberemos buscarla en las aproximaciones de niveles superiores.

Podemos ver que en la aproximación 9 la señal obtenida no contiene información que coincida con la onda T.



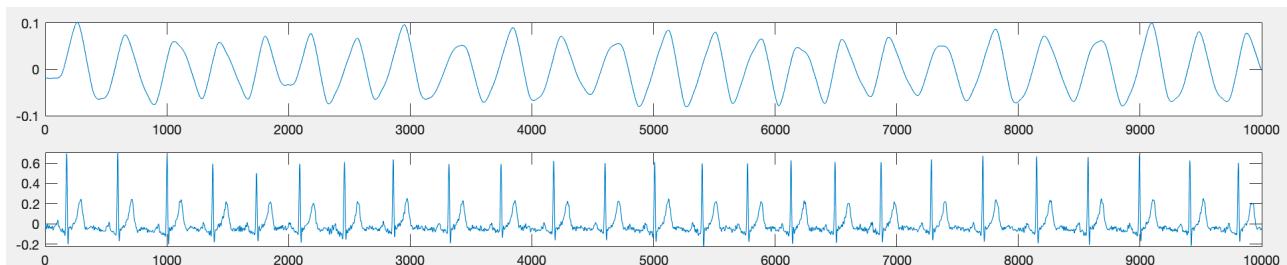
Adicionalmente en la aproximación 6 podemos ver cómo todavía alguna de las frecuencias de QRS pueden ser detectadas.



En esta última señal que contiene las frecuencias en el rango [0,3.9062]Hz la mayoría de información pertenece a la onda T, no obstante se ven múltiples pico que podrían dificultar su detección todavía.

Finalmente si nos quedamos con las frecuencias en el intervalo [0.24414, 1.9531]Hz obtendremos una señal con una perturbación aproximadamente en cada pico de la onda T. Podemos obtener esta señal con:

```
[detalle7,aprox7]=wavelet(ecg, 'coif3', 7);
[detalle9,aprox9]=wavelet(ecg, 'coif3', 9);
T=aprox7-aprox9;
```

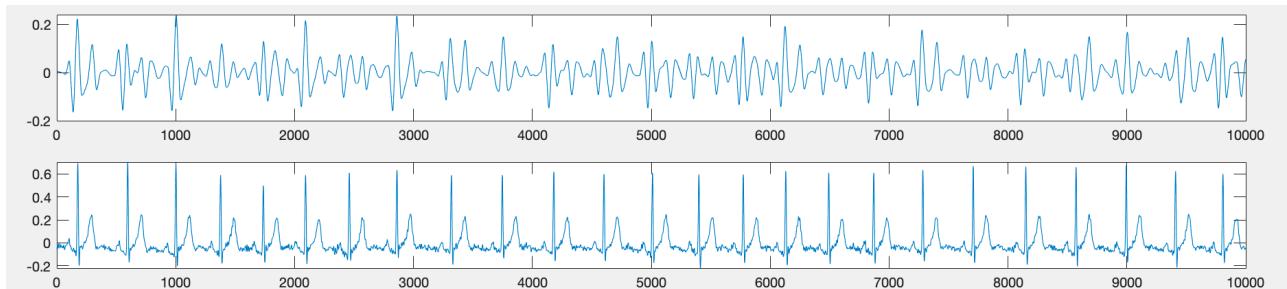


Detección de la onda P

Las frecuencias de la onda P se sitúan entre las del QRS y las de la onda T. Debido a que la onda P en el ECG elegido es muy pequeña su detección es más compleja. Si nos quedamos con las frecuencias de intervalo [3.9062, 7.8125] Hz, es decir, con el detalle 6 podremos ver la onda P de forma más o menos clara delante de cada QRS.

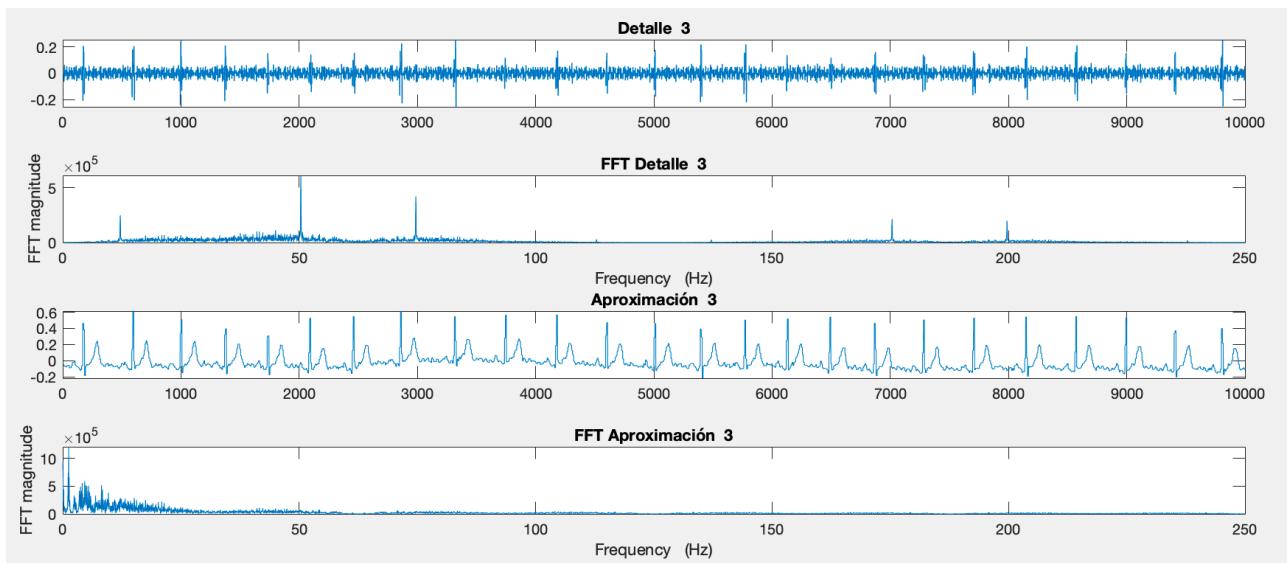
No obstante la onda no queda marcada de una forma tan clara como en los casos anteriores.

```
[detalle6,aprox6]=wavelet(ecg, 'coif3', 6);
T=detalle6;
```



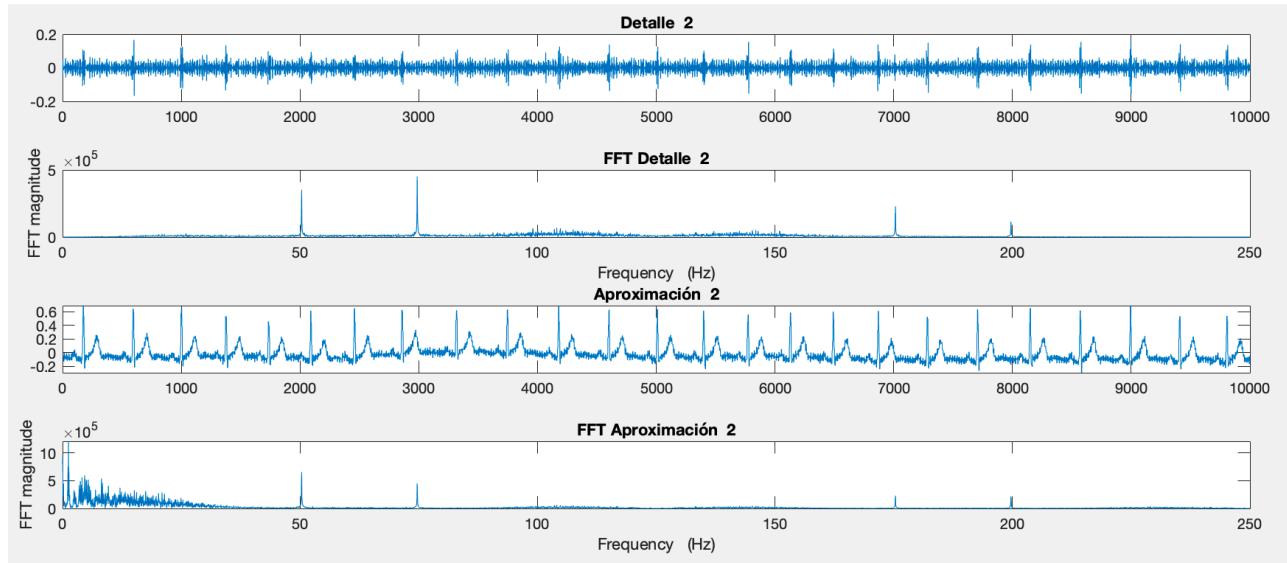
Visualización del ruido de 50Hz sobre señal sin filtrar

La detección del ruido de 50Hz puede hacerse en el detalle de nivel 3 que contendrá las frecuencias entre [31.25,62.5]Hz. Calculamos este detalle con la Wavelet Haar.



Vemos cómo en el detalle se han quedado las frecuencias del intervalo. No obstante aparecen también otras que no pertenece a él como un grupo de altas frecuencias entorno a los 200Hz y el situado entorno a los 175Hz.

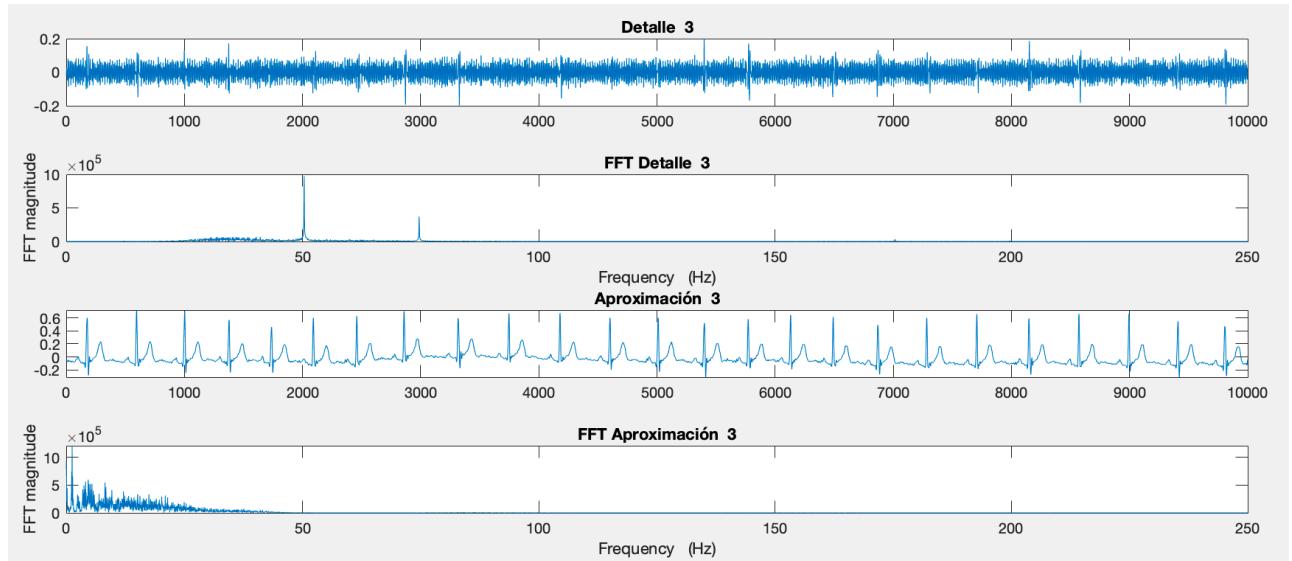
Aplicando el detalle de nivel 2 podemos ver que esto es algo habitual. En este detalle el ruido de 50Hz no debería de estar presente, solo debería de haber frecuencias en el intervalo de [62.5,125]Hz, no obstante se puede ver un pico en los 50Hz.



Es por tanto que las Wavelet no son el instrumento de filtrado más adecuado.

Utilizando otros tipos de Wavelet podemos ver que se producen resultados similares aunque en mayor o menor medida dependiendo de la que elijamos. Con la Wavelet db7

las frecuencias que se salen del intervalo son muchas menos y podemos aislar mejor el ruido de 50Hz.



Esto nos indica que dependiendo de los que deseemos realizar unas Wavelet nos ayudarán más que otras.