

Proyecto integrador 1 EIE40

Franco Urrutia Ghiardo, *Alumno, EIE,*

Abstract—Este informe detalla el procesamiento y análisis de una señal de ondas gravitacionales obtenida por el experimento LIGO-VIRGO. El procesamiento incluye la aplicación de ventanas, blanqueo de la señal, filtrado de banda y análisis espectral. Además, se generaron y reprodujeron audios de las diferentes etapas de procesamiento para evaluar los cambios introducidos.

Index Terms—LIGO-VIRGO, ondas gravitacionales, filtraje, transformada Q, espectrograma, agujero negro

I. INTRODUCCIÓN

LAS ondas gravitacionales, predichas por Einstein, fueron detectadas directamente por primera vez en 2015 por el observatorio LIGO. El análisis de las señales de ondas gravitacionales requiere un procesamiento cuidadoso debido al ruido y a las características de la señal. Este informe presenta un enfoque para el procesamiento y análisis de una señal de onda gravitacional utilizando técnicas de procesamiento de señales digitales.

II. MARCO TEÓRICO

A. Ventanas de Tukey

Las ventanas de Tukey, también conocidas como ventanas cosenoides, son utilizadas en el procesamiento de señales para reducir el efecto del filtraje espectral al trabajar con transformadas de Fourier. La ventana de Tukey se define como una combinación entre una ventana rectangular y una ventana cosenoidal

Un valor de $\alpha = 0$ corresponde a una ventana rectangular, mientras que $\alpha = 1$ corresponde a una ventana cosenoidal completa.

B. Transformada Q

La transformada Q (CQT, por sus siglas en inglés de Constant-Q Transform) es una herramienta utilizada en el análisis de señales que ofrece una resolución constante en el dominio de la frecuencia logarítmica. A diferencia de la transformada de Fourier de tiempo corto (STFT), la CQT proporciona una mejor resolución en las frecuencias bajas y una menor resolución en las frecuencias altas, lo que la hace adecuada para el análisis de señales musicales y otras aplicaciones donde la percepción humana de la frecuencia es logarítmica.

La CQT se define como:

$$X_k(n) = \sum_{m=0}^{N_k-1} x(n+m) \cdot w_k(m) \cdot e^{-j2\pi \frac{mQ}{N_k}} \quad (1)$$

donde N_k es el tamaño de la ventana en la banda k , Q es el factor de calidad que define la relación entre la frecuencia

central y el ancho de banda de cada banda, $w_k(m)$ es la ventana aplicada en la banda k y $x(n)$ es la señal de entrada.

La CQT es especialmente útil para representar señales que contienen componentes armónicos o frecuencias que cambian logarítmicamente. En el procesamiento de señales, se utiliza para generar espectrogramas que permiten una visualización clara de las características frecuenciales de una señal en el tiempo. [2]

III. METODOLOGÍA

Se obtuvieron datos públicos del experimento LIGO-VIRGO y se procedió a procesarlos. La etapa de procesamiento se basó constantemente comprobar por audio como iba modificándose la señal, de esta manera se pudo comprobar que todos los pasos si afectaban a la señal, esto junto a un análisis espectral ayudaron a que no hubiesen pasos innecesarios. Los pasos específicos en cuestión fueron los siguientes:

- Aplicar una ventana de Tukey, esto se hizo para evitar filtraje espectral al trabajar con transformadas de Fourier.
- Blanquear la señal, se usó el inverso de la raíz cuadrada de la PSD (ASD) para poder normalizar las muestras en el dominio frecuencial y se usó la transformada inversa de Fourier para volver al dominio temporal.
- Se filtro la señal con un filtro pasa-banda Butterworth de cuarto orden entre 30hz y 400hz que es el estimado de donde se esperaba encontrar la señal buscada [1] [4].
- Se realizó la transformada Q constante (CQT) de la señal, generando un espectrograma, esto fue especialmente importante para ver la señal de manera gráfica, se aplicó un *threshold* al espectrograma para resaltar aún más la señal buscada, finalmente se volvió a filtrar con un filtro Butterworth de las mismas características al anteriormente nombrado para eliminar el ruido generado por la transformada Q, esto sucede porque la transformada Q está relacionada a la transformada corta de Fourier por lo que agrega ruido al usar la inversa de esta. En este punto ya se obtuvo una señal correspondiente a ondas gravitacionales.

IV. RESULTADOS

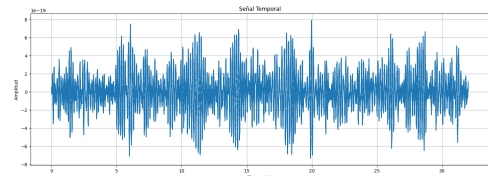


Fig. 1. Señal Original de LIGO-VIRGO.

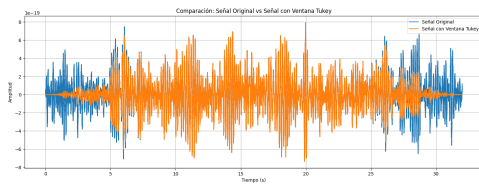


Fig. 2. Comparación señales ventaneadas.

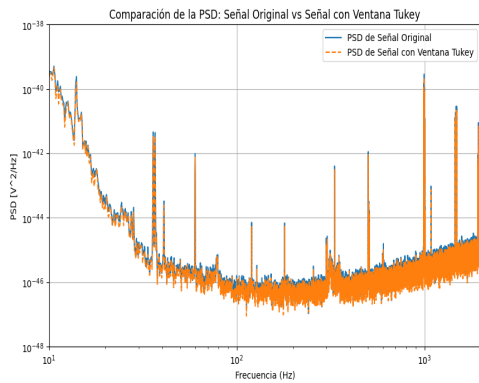


Fig. 3. Comparación PSD con y sin ventana.

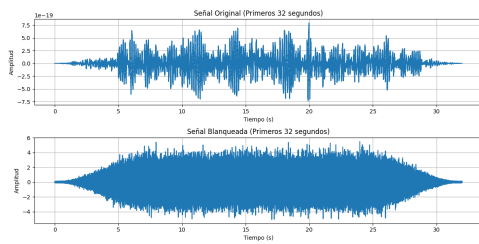


Fig. 4. Comparación señal ventaneada con señal blanqueada.

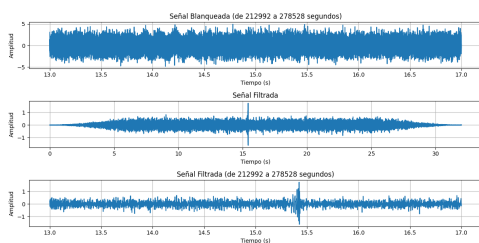


Fig. 5. Comparación señal blanqueada con filtrada.

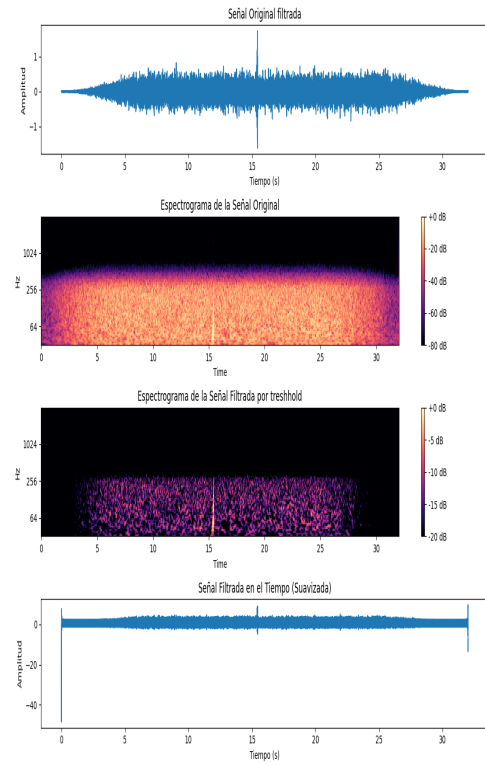


Fig. 6. Comparación señales finales y espectrograma.

V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados encontrados en este trabajo están inspirados en la metodología del tratamiento de señales del experimento LIGO-VIRGO. En la primera imagen se puede apreciar como llega la señal a los detectores (H1 en este caso), solo se puede apreciar ruido, si bien hay picos notables en la señal estos probablemente se deban a ruido mecánico del mismo detector, ruido de línea eléctrica y ruido espacial no relacionado al experimento. Al aplicar una ventana de Tukey, se suavizan los extremos, esto es útil para convertirlo al dominio de la frecuencia para generar una "falta periodicidad" en la señal y evitar fuga espectral, esta ventana tiene la cualidad de recibir un parámetro llamado alfa el cual varía entre 0 y 1, siendo 0 una ventana cuadrada y 1 una ventana de Hanning.

Al aplicar la ventana se puede comprobar que la densidad espectral de potencia se mantiene relativamente consistente con la densidad previa a aplicar la ventana.

Usando la técnica de blanqueo nombrada en la metodología se aprecia una señal mucho menos clara, pero la realidad es que esta señal está a un paso de poder revelar información, solo falta filtrarla.

Al implementar un filtro pasabanda de cuarto orden se pudo extraer de inmediato un pico en el dominio temporal, esto marca lo que se busca, el sonido de un agujero negro.

Finalmente se usa la transformada Q para poder crear un espectrograma, en el cual se aplicó un threshold para ver con mayor claridad. ¿Por qué la transformada Q? Dado que se buscaba generar una señal de audio esta transformada es especialmente útil, relacionada a la transformada corta de Fourier y la wavelet compleja Morlet [3], tiene usos extensos en el campo de la música [5].

REFERENCES

- [1] Salim Boudad, *Détection d'ondes gravitationnelles par apprentissage automatique et filtrage adaptatif*, Université Paris-Saclay, 2020. Disponible en: <https://theses.hal.science/tel-02878783>
- [2] D. A. Brown, *Searching for gravitational waves with the Q transform*, Classical and Quantum Gravity, vol. 21, no. 1, pp. S797–S800, 2004. Disponible en: <http://academics.wellesley.edu/Physics/brown/pubs/cq1stPaper.pdf>
- [3] Julius O. Smith III, *Continuous Wavelet Transform*, 2020. Disponible en: https://ccrma.stanford.edu/~jos/sasp/Continuous_Wavelet_Transform.html
- [4] LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, *Gravitational Wave Open Science Center*, 2024. Disponible en: <https://gwosc.org/path/>
- [5] Brian McFee, Colin Raffel, Dawen Liang, Daniel P. W. Ellis, Matt McVicar, Eric Battenberg, and Oriol Nieto, *librosa: Audio and Music Signal Analysis in Python*, librosa, 2015. Disponible en: <https://librosa.org/doc/main/generated/librosa.cqt.html>