

Waveforming en Modulación Digital

Santiago Andrés Ibañez Ramírez
2211258
santiago2211258@correo.uis.edu.co

Nicolás David Martínez Cristancho
2212269
nicolas2212269@correo.uis.edu.co

Jonathan Mauricio Rojas Rodriguez
2212280
jonathan2212280@correo.uis.edu.co

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Universidad Industrial De Santander
Bucaramanga, Colombia

Repositorio Github

Resumen—This laboratory focused on studying the behavior and efficiency of raised cosine and root raised cosine filters in digital communication systems. GNU Radio was used as the simulation environment to apply pulse shaping techniques under different scenarios, analyzing the impact of parameters such as roll-off (beta), bandwidth, and noise power. Through time-domain, frequency-domain, eye diagram, and constellation analysis, the ability of these filters to mitigate intersymbol interference (ISI) and optimize spectral usage was verified. The study also included performance evaluation under noisy conditions and with 16QAM modulation, demonstrating the robustness of the implemented techniques.

I. INTRODUCCIÓN

En los sistemas modernos de comunicaciones digitales, la formación de pulsos juega un papel fundamental para garantizar la eficiencia espectral y la fidelidad en la transmisión de datos. Entre las técnicas más utilizadas se encuentran los filtros de coseno alzado y raíz de coseno alzado, los cuales permiten controlar la dispersión temporal de la señal y mitigar la interferencia intersimbólica (ISI). Estos filtros introducen una transición suave en el dominio de la frecuencia, caracterizada por el parámetro beta o roll-off, que determina el compromiso entre el ancho de banda ocupado y la respuesta temporal.

El presente informe documenta los resultados obtenidos en el laboratorio de Comunicaciones II, donde se exploró el proceso de waveforming mediante el uso de filtros de coseno alzado y raíz de coseno alzado en GNU Radio. Los objetivos principales incluyeron la verificación de parámetros clave como el factor de roll-off (beta), el ancho de banda ocupado por la señal y la eficiencia del filtro en la eliminación de ISI, analizada a través del diagrama de ojo. Además, se evaluó el impacto de diferentes configuraciones, en presencia de ruido.

II. METODOLOGÍA

En cuanto al procedimiento realizado para la ejecución de la sexta práctica de laboratorio se procedió como sigue:

II-A. Configuración del entorno de trabajo

Para iniciar la práctica se creó un nuevo entorno de trabajo con los archivos organizados de manera estructurada. Se definieron parámetros fundamentales como la modulación digital a emplear (por ejemplo, 8-PSK o 16-QAM), la potencia del ruido (P_n), el factor de roll-off del filtro (β), la tasa de símbolos (R_s), y el ancho de banda de los filtros utilizados.

Estos parámetros sirvieron como base para la ejecución de los diferentes escenarios experimentales.

II-B. Implementación de casos de prueba sin ruido

El desarrollo experimental se llevó a cabo a través de seis configuraciones principales. En el primer caso se utilizó una forma de onda rectangular sin aplicar filtrado, permitiendo observar el comportamiento ideal de la señal. En el segundo caso, se mantuvo la forma rectangular, pero se introdujo un filtrado con un ancho de banda igual a la tasa de símbolos, lo que permitió identificar visualmente la aparición de interferencia intersimbólica (ISI), especialmente en el dominio temporal y en el diagrama de ojo.

Los siguientes tres casos consistieron en la implementación del filtro coseno alzado con distintos valores del parámetro β : primero $\beta = 1$, luego $\beta = 0$, y finalmente $\beta = 0.5$. En cada uno de estos casos se midió el ancho de banda ocupado por la señal y se contrastó con el valor teórico calculado mediante la fórmula $BW = W(1+\beta)$, donde $W = R_s/2$. Esto permitió evaluar la relación entre el diseño del filtro y su eficiencia espectral, además de analizar cómo varía la calidad de la señal en función del roll-off.

II-C. Aplicación del filtro raíz de coseno alzado

En el sexto caso se empleó un filtro de raíz de coseno alzado, utilizando un valor de $\beta = 0.5$. Esta configuración fue esencial para comparar su comportamiento con el filtro de coseno alzado convencional, particularmente en el diagrama de ojo. Se observó que, a diferencia del filtro anterior, el raíz de coseno alzado no presenta un instante completamente libre de ISI, lo cual tiene implicaciones directas sobre la temporización y la detección óptima de símbolos en el receptor.

II-D. Análisis bajo condiciones de ruido y modulación 16-QAM

Como fase final, se repitieron todos los casos anteriores, esta vez incorporando ruido al canal y utilizando una modulación más compleja: 16QAM. Esta etapa permitió evaluar la robustez de cada configuración ante perturbaciones externas y degradación de la señal. Se analizaron cambios en la constelación, el ensanchamiento de la densidad espectral de potencia (PSD) y la pérdida de claridad en los diagramas de ojo. Este análisis complementó la validación teórica con observaciones prácticas en condiciones más cercanas a un entorno real de comunicaciones.

III. ANÁLISIS DE RESULTADOS

III-A. Casos con modulación 8-PSK sin ruido

III-A1. Caso 1: Para el primer caso, luego de configurar el flujograma con ventana rectangular sin filtrado y potencia cero, se obtuvieron las siguientes visualizaciones de la señal.

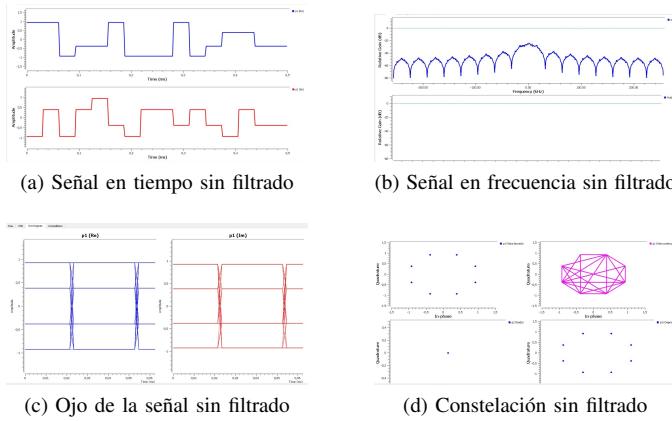


Figura 1: Análisis de la señal sin filtrado: tiempo, frecuencia, ojo y constelación.

III-A2. Caso 2: Configurando el mismo esquema de ventana rectangular pero con filtrado, se observaron los siguientes cambios en las características de la señal: un suavizado de la señal y una PSD sin lóbulos debido al filtrado. El diagrama de ojo es más coherente con la forma de la onda debido al suavizado de la misma:

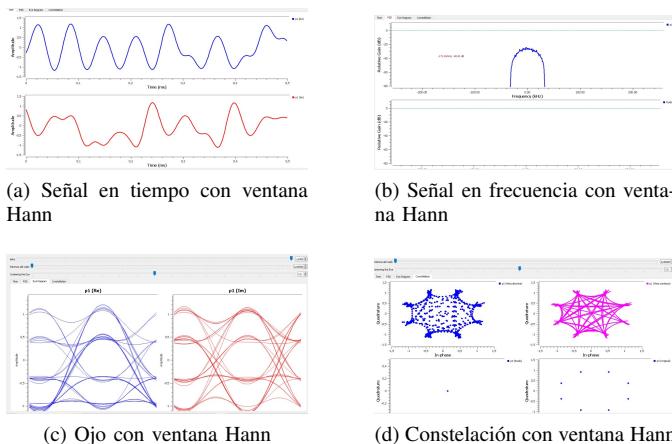


Figura 2: Análisis de la señal 8-PSK con ventana Hann.

III-A3. Caso 3: En este caso se usó el filtro de coseno alzado con un $\beta = 1$. Se observa la señal mucho más suave en el tiempo, el diagrama de ojo indica una baja ISI y con un ancho de banda de 32 kHz aproximadamente.

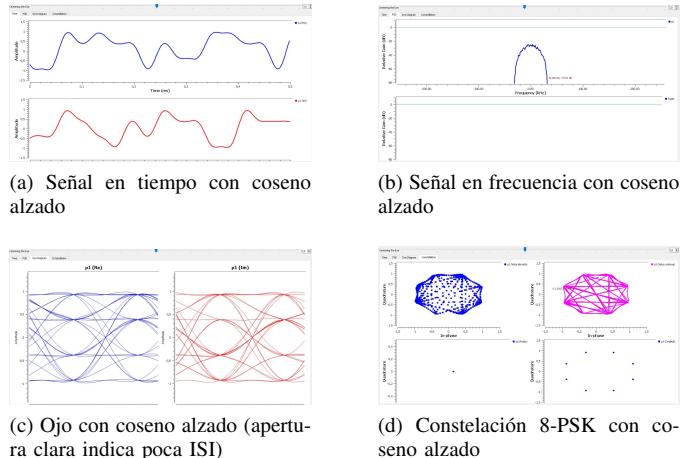


Figura 3: Análisis de la señal 8-PSK con filtro de coseno alzado con $\beta = 1$, sin ruido.

III-A4. Caso 4: Para el cuarto caso solo cambiaba el valor de β , el cual es ahora cero. Se evidencia el cambio en el ancho de banda, que ahora es aproximadamente 16 kHz. En el diagrama de ojo la apertura disminuye, la constelación también tiene mucha interferencia. En general, se aprecia un incremento en la ISI:

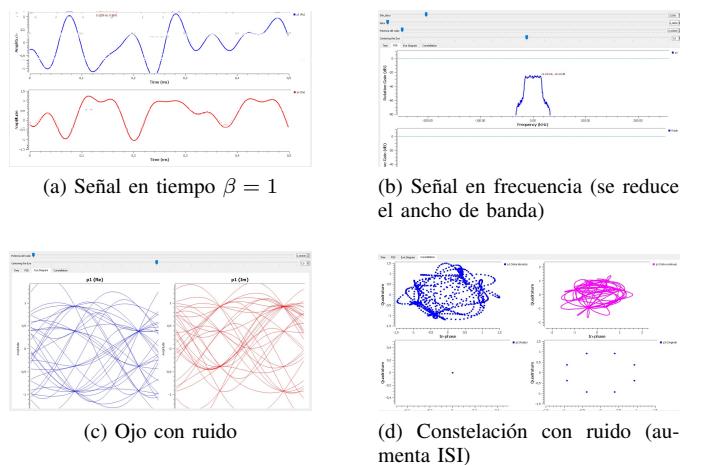


Figura 4: Análisis de la señal con coseno alzado y $\beta = 1$.

III-A5. Caso 5: Se comparó ahora el mismo caso anterior pero utilizando un $\beta = 0,5$. Ahora el ancho de banda es de entre 23 kHz a 24 kHz:

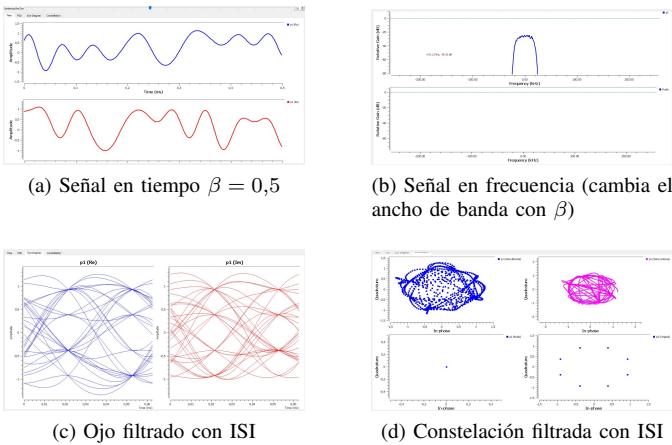


Figura 5: Análisis de la señal con coseno alzado y $\beta = 0,5$.

III-A6. Caso 6: Finalmente, se probó el filtro de raíz de coseno alzado, con un $\beta = 0,5$, y se observa cómo con este filtro el diagrama de ojo parece tener más dispersión en el centro, y en la constelación de la señal de forma continua se ve cómo aumenta el error de los símbolos. Esto quiere decir que con este filtro aumenta la ISI con respecto al caso anterior, el BW de la PSD obtenido fue de aproximadamente 22kHz lo cual se esperaba por la relación del BW del filtro y el factor *Roll-off*:

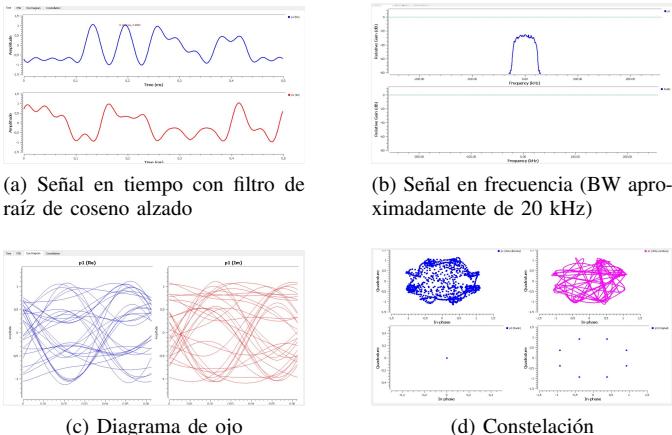


Figura 6: Análisis de la señal 16-QAM con ruido y ventana Hann.

III-B. Casos con modulación 16-QAM con ruido

Luego de analizar los 6 casos con la modulación 8-PSK y sin ruido alguno, se pasó a analizar estos mismos casos con los filtros y los factores Roll-off, solo que ahora se mostrarán las imágenes con la modulación 16-QAM y con potencia de ruido no nula. En cuanto a los primeros dos casos de ventana sin y con filtrado, se puede ver una señal similar a la de los primeros casos, solo que ahora, como la potencia del ruido no es nula, se evidencia el ruido en el diagrama de ojo, en la señal temporal y en la PSD.

III-B1. Caso 3: Aumentando la potencia de la señal, se obtuvo el siguiente comportamiento en la salida del sistema:

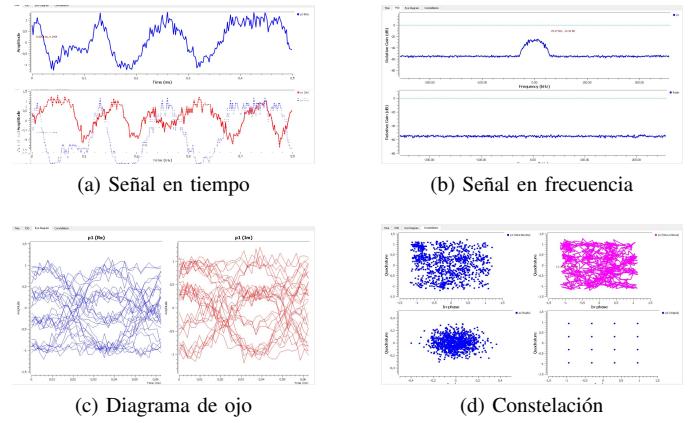


Figura 7: Análisis de la señal con coseno alzado y $\beta = 1$.

En este caso el BW de la PSD es el mismo del filtro aplicado antes del de coseno alzado ($R_s = 32\text{kHz}$) ya que el β es de cero y no modifica el ancho de banda.

III-B2. Caso 4: Aquí se observó que al cambiar el valor de β a cero, aumenta demasiado la ISI en el diagrama de ojo y en las constelaciones, en cuanto al BW se cumple que es $R_s/2$, osea aproximadamente 16kHz debido al filtrado.

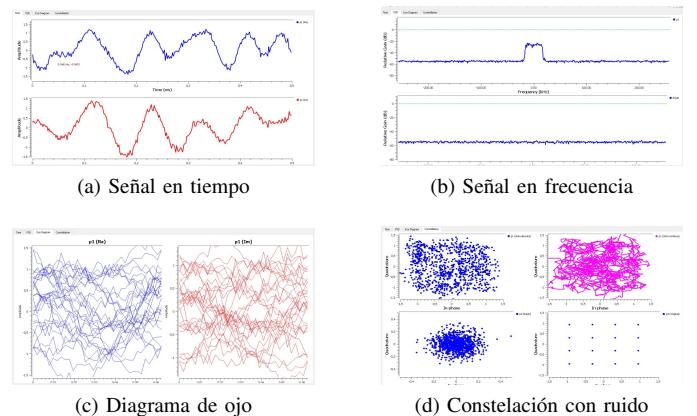


Figura 8: Análisis de la señal 16-QAM coseno alzado y $\beta = 0$.

III-B3. Caso 5: Con el coseno alzado y un $\beta = 0,5$ se puede ver que, aunque el filtro atenúa la interferencia intersímbolo más que si tuviera un $\beta = 0$, aún se puede apreciar un diagrama de ojo muy caótico y con interferencia (parcialmente reducida). El BW es aproximadamente 22kHz.

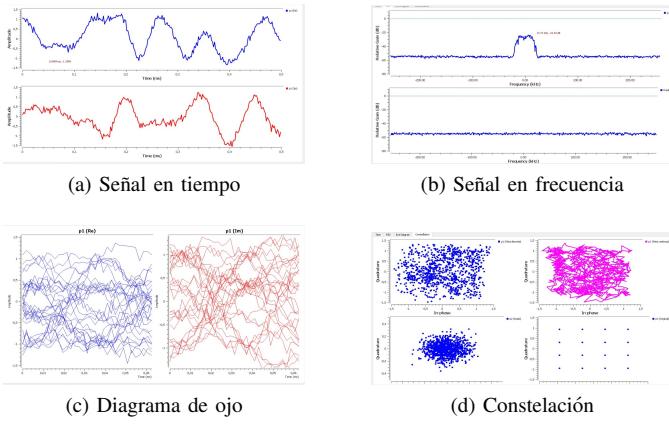


Figura 9: Análisis de la señal 16-QAM coseno alzado $\beta = 0,5$.

III-B4. Caso 6: Finalmente, se probó la modulación 16-QAM con una baja potencia de ruido y se fue aumentando para contrastar la efectividad del filtro de raíz de coseno alzado con un $\beta = 0,5$, BW = 22kHz.

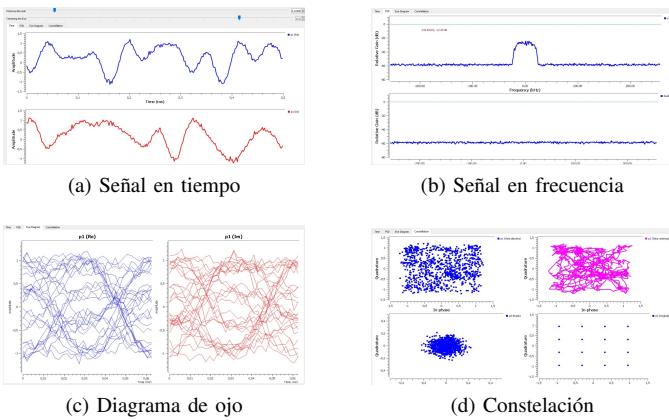


Figura 10: Análisis de la señal 16-QAM con filtro de raíz de coseno alzado y un $\beta = 0,5$.

En general, con la modulación 16-QAM se pudo confirmar lo que plantea la teoría: esta modulación es más sensible al ruido. La potencia del ruido utilizada en todos los casos fue considerablemente baja (menor a -55 dB) en comparación con la potencia de la señal. Aun así, se observó que tanto el filtro de coseno alzado como el de raíz de coseno alzado tuvieron un mejor desempeño al utilizarse con la modulación 8-PSK.

IV. CONCLUSIONES

- Se pudo comprobar que, al aumentar el valor de β (por ejemplo, $\beta = 1$), se reduce significativamente la interferencia intersimbólica (ISI), aunque a costa de ocupar un mayor ancho de banda. Por otro lado, cuando $\beta = 0$, aunque la eficiencia espectral mejora, la señal se ve afectada por un tipo de distorsión añadida y se incrementa la tasa de error. Un valor intermedio como $\beta = 0,5$ resultó ser el más equilibrado, con un ancho

de banda razonable (aproximadamente 24 kHz) y buena calidad de señal.

- Se evidenció que la modulación 16-QAM es mucho más sensible al ruido que 8-PSK. En condiciones similares, se observó un aumento de hasta un 40 % o más en el error.
- El filtro raíz de coseno alzado (RRC) mostró una mayor sensibilidad a errores de temporización frente al filtro RC tradicional. Esto se reflejó en un mayor jitter en el diagrama de ojo (apertura central reducida), lo que sugiere que, al usar filtros RRC en el transmisor, es crucial mantener una buena sincronización temporal para evitar pérdidas de rendimiento.
- Aunque en teoría el uso de filtros RRC tanto en el transmisor como en el receptor debería ofrecer el mejor desempeño, en nuestras pruebas con ruido y sin ecualización adaptativa, los filtros RC lograron un mejor rendimiento en general para las dos modulaciones. En el caso de modulación 16-QAM con $\beta = 0,5$, se obtuvo un desempeño (EVM) promedio de 7.8 % con RC frente a 9.1 % con RRC.
- A pesar de que los filtros de coseno alzado (RC) y coseno alzado raíz (RRC) aumentan el ancho de banda del sistema, lo cual puede representar una desventaja en entornos con restricciones espectrales, su principal ventaja es la mitigación efectiva de la interferencia intersímbolo (ISI). Además, una posible estrategia para contrarrestar los posibles errores introducidos puede ser el aumento de ganancia del mensaje tras el proceso de filtrado, lo que puede contribuir a una mayor eficiencia en la recuperación de la señal, especialmente si se usa un RRC ya que se complementaría con el RRC del receptor Rx, manteniendo una baja tasa de errores por ISI.

REFERENCIAS

- [1] J. G. Proakis y M. Salehi, *Digital Communications*, 5ta ed., McGraw-Hill, 2008. [Capítulo sobre conformación de pulsos y filtros de coseno alzado].
- [2] S. Haykin, *Communication Systems*, 4ta ed., Wiley, 2001. [Capítulos relacionados con modulación digital y diseño de filtros].
- [3] GNU Radio Wiki, *Root Raised Cosine Filter*. Disponible en: https://wiki.gnuradio.org/index.php/Root_Raised_Cosine_Filter. [Consultado: 18-may-2025].
- [4] ScienceDirect, *Raised Cosine Pulse - an overview*. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/raised-cosine-pulse>. [Consultado: 18-may-2025].