



Práctica 6: Waveforming en Modulación Digital

Anderson David Hernandez Rodriguez - 2202930

Karen Daniela Rangel Uribe - 2191709

Sharon Catalina Vargas Cortes - 2211259

[https://github.com/COM2-GRUPO2/COM2_B1_G2](https://github.com/COM2-GRUPO2/COM2_B1G2)

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Universidad Industrial de Santander

16 de mayo de 2025

Abstract

This laboratory focused on pulse shaping using raised cosine and root-raised cosine filters, which are essential in digital modulation to minimize intersymbol interference (ISI). Various filter configurations were evaluated to assess their impact on signal bandwidth, time- and frequency-domain representations, and transmission quality as observed in eye diagrams. Cases without filtering, with rectangular filtering, and with different roll-off factors (β) in raised cosine filters were compared. The results validated the theoretical relationship between occupied bandwidth and β , and demonstrated how waveform choice influences symbol clarity, particularly under noisy conditions.

1. Introducción

La formación de pulsos (pulse shaping) es una etapa fundamental en los sistemas de comunicación digital, cuyo propósito es moldear la señal transmitida para controlar su contenido espectral y reducir la interferencia intersimbólica (ISI). Entre las técnicas de filtrado más empleadas se encuentran el filtro de coseno alzado y su variante raíz de coseno alzado, que permiten ajustar el compromiso entre eficiencia espectral y confinamiento temporal mediante el factor (β). Se exploraron diferentes escenarios de formación de pulsos: señales sin filtrado (rectangulares), con filtrado rectangular y con filtrado de coseno alzado para varios valores de β . A través del análisis de la ocupación de ancho de banda, las formas de onda en el dominio del tiempo y la frecuencia, y la calidad de los diagramas de ojo, se ilustró cómo la elección del filtro y sus parámetros impactan en la claridad de los símbolos recibidos y en la robustez del enlace, especialmente en presencia de ruido. Esta práctica proporciona una base sólida para el diseño de filtros de transmisión en aplicaciones de comunicaciones reales.

2. Metodología

Para llevar a cabo el laboratorio se empleó un flujo de señal basado en bloques de “pulse shaping” y filtrado, configurados según el tipo de onda deseada. En primer lugar, se definió la constelación (por ejemplo, 8PSK o 16-QAM) y la tasa de símbolos (R_s) correspondiente, así como la potencia del ruido (P_n) que, en las primeras etapas, se mantuvo en cero para aislar los efectos del filtrado. A continuación, se seleccionó el tipo de formador de pulsos: rectangular (sin filtrado) o coseno alzado/raíz de coseno alzado, ajustando el parámetro de roll-off (β) según los casos de estudio.

Cada configuración se implementó en dos variantes: en banda base, utilizando un simple bloque de interpolación FIR con respuesta al impulso rectangular o de coseno alzado; y en pasabanda, añadiendo un filtro pasa-bajas adicional para restringir el ancho de banda de salida. Para los filtros de coseno alzado y raíz de coseno alzado, se eligieron diversas combinaciones de β (0, 0.5 y 1.0) y se midió su efecto teórico sobre el ancho de banda, calculado como $BW = (R_s/2) \cdot (1 + \beta)$.

El proceso experimental consistió en capturar, para cada caso, 4 tipos de resultados gráficos: dominio de tiempo, dominio de la frecuencia (PSD), diagrama de ojo y diagrama de constelaciones.

En una etapa final, se compararon los resultados de todos los casos—sin filtrado, rectangular filtrado y coseno alzado con distintos—analizando la correspondencia entre el ancho de banda calculado y el medido, así como la calidad de la señal en presencia de ruido al implementar modulaciones de orden superior.



2.1. Caso 1 - Ruido con potencia cero sin filtrado

Para el Caso 1, se utilizaron formas rectangulares sin filtrado y el ruido con potencia cero. Los parámetros de configuración utilizados fueron los siguientes: la constelación utilizada fue 8-PSK, con una ventana (h) configurada como $h = [1] \times Sps$, lo que corresponde a una ventana rectangular discreta. El ancho de banda del filtro pasa bandas se calculó como $BW_{filtro} = samp_rate/2$, resultando en un valor de 128 kHz. El factor de roll-off (β) fue establecido en 1, y la tasa de símbolos (Rs) se configuró como $Rs = 8000 \times N_{grupo}$, con $N_{grupo} = 1$, lo que da un valor de $Rs = 8000$. Finalmente, la potencia del ruido (Pn) fue igual a 0, ya que no se introdujo ruido en este caso. El ancho de banda calculado (BW) fue de 128 kHz, lo que se mantuvo consistente con el ancho de banda medido. Estos parámetros permitieron observar el impacto de las formas rectangulares sin filtrado sobre la señal, proporcionando una base para analizar los efectos de los filtros en los casos siguientes.

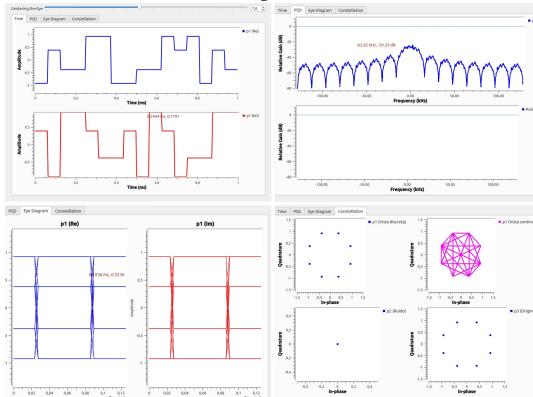


Figura 1. Caso 1 - sin filtrado

En la fig 1, se observó la presencia de Interferencia Intersimbólica (ISI), lo que causó que los símbolos se solaparan entre sí. El Diagrama de Ojo mostró un ojo cerrado, indicando que la señal no era lo suficientemente clara para separar los símbolos sin cometer errores. La constelación de la señal se presentó más dispersa, lo que refleja la falta de definición entre los símbolos debido a la ISI. Además, la Densidad Espectral de Potencia (PSD) mostró un espectro más amplio, lo que es característico cuando no se aplica filtrado, ya que el control sobre el ancho de banda de la señal es insuficiente. Estos resultados evidencian cómo la ausencia de un filtro adecuado aumenta la interferencia entre símbolos y empeora la calidad de la señal, lo que sirve como base para comparar la mejora que aporta el filtrado en los siguientes casos.

2.2. Caso 2 - Filtrado

Para el Caso 2, se utilizaron formas rectangulares con filtrado BW-filtro= Rs y el ruido con potencia cero.

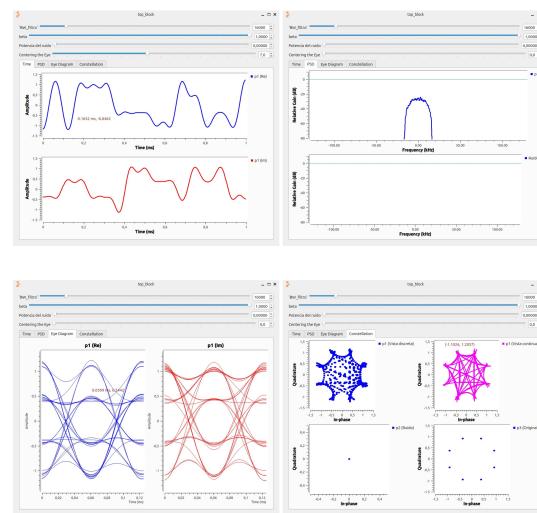


Figura 2. Caso 2 - Filtrado

En la fig 2, los resultados muestran una señal más clara y con menos interferencia intersimbólica (ISI) en comparación con el Caso 1. La Densidad Espectral de Potencia (PSD) muestra un pico estrecho y centrado en 0 kHz, lo que indica que el filtro pasabajas ha restringido efectivamente el ancho de banda de la señal. En el dominio del tiempo, las señales real e imaginaria son más suaves y regulares, lo que refleja la reducción de la ISI gracias al filtrado. La constelación de la señal filtrada muestra los puntos más concentrados, mejorando la resolución y facilitando la decodificación de los símbolos. Finalmente, el diagrama de ojo presenta un ojo abierto, lo que indica que el filtrado ha mejorado la calidad de la señal al eliminar los problemas de solapamiento entre los símbolos. Estos resultados evidencian cómo el filtrado mejora la claridad de la señal, reduciendo la interferencia y mejorando su interpretación.

2.3. Caso 3 - Coseno Alzado, beta=1

Para el Caso 3, se utilizó la forma de coseno alzado con beta= 1 y el ruido con potencia cero.

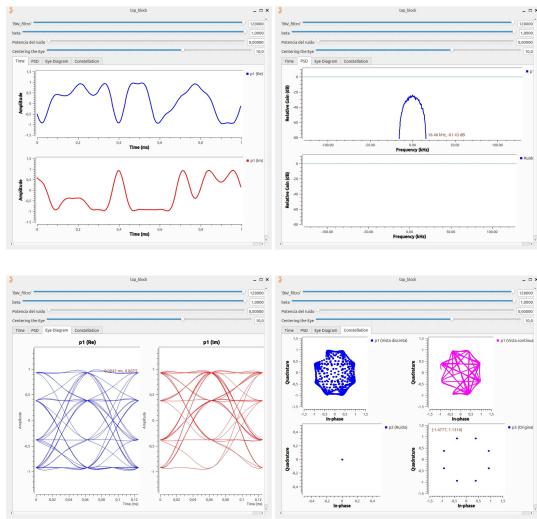


Figura 3.

Caso 3 - Coseno alzado, beta=1

En la fig 3, al usar forma coseno alzado con beta=1 y ruido con potencia cero, los resultados muestran una mejora significativa en la calidad de la señal. La PSD indica que el filtro ha restringido adecuadamente el ancho de banda, mientras que el diagrama de ojo abierto y la constelación compacta reflejan la reducción de interferencia intersímbólica (ISI). Estos resultados demuestran la efectividad del filtro coseno alzado en la mejora de la señal y su decodificación.

2.4. Caso 4 - Coseno Alzado - beta=0

Para el Caso 4, se utilizó la forma de coseno alzado con beta= 0 y el ruido con potencia cero.

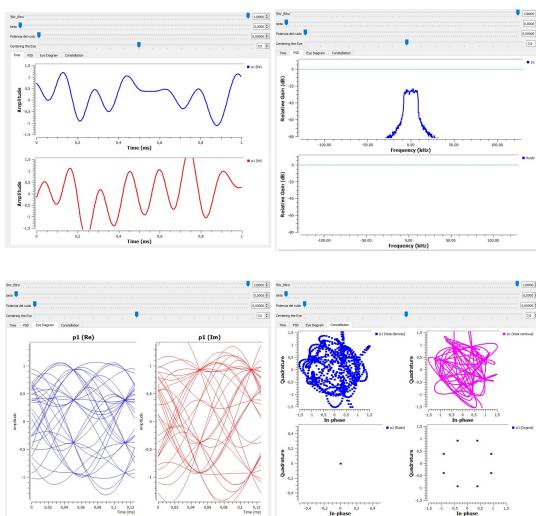


Figura 4. Caso 4 - Coseno alzado, beta=0

En la fig 4, al usar el filtro coseno alzado con beta=0 y ruido con potencia cero, los resultados muestran una señal altamente afectada por interferencia entre símbolos (ISI) y ruido. La Densidad Espectral de Potencia (PSD) muestra un pico estrecho centrado en 0 kHz, lo que indica que el filtro ha restringido el ancho de banda de la señal. Sin embargo, la forma de la señal no es tan bien definida, lo que podría ser una consecuencia de la transición abrupta del filtro debido a beta=0. Esto genera más distorsión y solapamiento entre los símbolos. En el dominio del tiempo, las señales real e imaginaria muestran oscilaciones caóticas, lo que refleja un alto nivel de ISI. La constelación también está desordenada y dispersa, lo que indica que el filtro no ha logrado reducir la interferencia entre símbolos y el ruido está afectando fuertemente la señal. Finalmente, el diagrama de ojo presenta un ojo cerrado, lo que confirma que la separación entre símbolos es insuficiente debido a la falta de suavidad en las transiciones del filtro. Este análisis sugiere que un valor de beta>0 podría mejorar la señal al reducir la interferencia y mejorar la decodificación como en el caso 3.

2.5. Caso 5 - Análisis de señal QPSK en canal ideal

En la Fig.5, se observa una señal modulada con una constelación considerablemente dispersa, lo cual indica la presencia de distorsión por ruido. En el dominio del tiempo (gráficas superior izquierda), las componentes real e imaginaria presentan variaciones suaves sin cortes abruptos, lo que sugiere una forma de modulación continua. El espectro de potencia (gráficas superior derecha) muestra una concentración de energía en el centro del espectro, indicando una señal pasabanda bien definida, mientras que el canal de ruido permanece plano, lo cual confirma que aún no hay adición significativa de ruido. En los diagramas de ojo (inferior izquierda), los trazos están completamente cerrados, lo cual denota que no hay una separación clara entre símbolos, lo que sugiere una alta interferencia intersímbolo. Finalmente, en las gráficas de constelación (inferior derecha), la señal "p1" aparece altamente dispersa, lo que dificulta la identificación de los símbolos transmitidos, mientras que las referencias "p2" (ruido) y "p3" (original) se mantienen puntuales, destacando el deterioro de la señal modulada en el canal. Estos resultados reflejan una pobre recuperación de la señal bajo las condiciones actuales del sistema.

2.6. Caso 6 - Impacto del ruido sobre la señal QPSK

En la Fig.6, se observa el efecto del aumento de la potencia del ruido sobre la señal QPSK transmitida. En el dominio del tiempo (gráficas superior izquierda), las formas de onda de las componentes real e imaginaria presentan una mayor fluctuación, lo que indica una perturbación significativa del canal. El espectro de potencia (superior derecha) conserva su forma general, pero con una leve elevación del piso de ruido, señalando la adición de componentes indeseadas. Los diagramas de ojo (inferior izquierda) muestran un entrecruzamiento más pronunciado respecto al caso anterior, lo que dificulta la correcta decisión de los símbolos, producto del incremento en la interferencia intersimbólica. Finalmente, en los diagramas de constelación (inferior derecha), la dispersión de los puntos correspondientes a la señal “p1” es notablemente mayor, y los símbolos ya no se agrupan claramente en las cuatro posiciones ideales. Esta degradación visual evidencia que el sistema se encuentra operando en condiciones de canal ruidoso, con una menor relación señal a ruido (SNR), lo que compromete la fiabilidad de la comunicación.

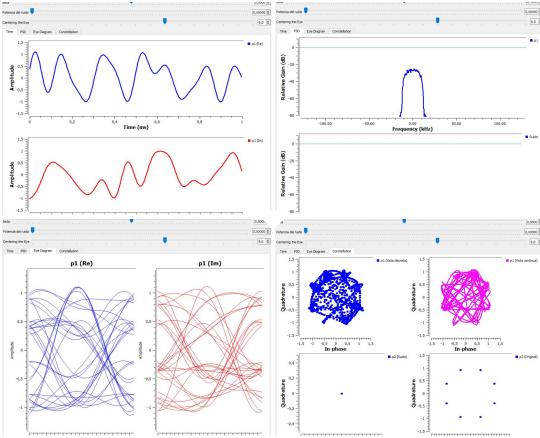


Figura 6. Impacto del ruido sobre la señal QPSK

2.7. Caso 7 - Degradación de la señal QPSK bajo alta potencia de ruido

En la Fig.7, se evidencia un deterioro considerable en la calidad de la señal QPSK debido al aumento de la potencia del ruido. En las gráficas del dominio del tiempo (superior izquierda), las señales real e imaginaria mantienen una estructura oscilatoria, pero con mayor irregularidad respecto a los casos previos, lo que refleja la presencia significativa de perturbaciones. En el espectro de potencia (superior derecha), el piso de ruido se eleva de forma visible, aunque aún es posible identificar el lóbulo principal de la señal modulada. En los diagramas de ojo (inferior izquierda), la apertura característica se ve comprometida por la superposición de trayectorias, lo que indica un inicio de interferencia intersimbólica. Las constelaciones (inferior derecha) muestran una clara dispersión de los puntos correspondientes a la señal recibida (“p1”), aunque todavía es posible reconocer las agrupaciones en torno a los puntos ideales. La constelación del ruido (“p2”) forma una nube circular densa, mientras que la constelación original (“p3”) se

eleva, indicando una menor relación señal-ruido. En los diagramas de ojo (inferior izquierda), las trayectorias se entrecruzan fuertemente, mostrando una alta interferencia intersimbólica que compromete la recuperación de símbolos. Este efecto es aún más evidente en las gráficas de constelación (inferior derecha), donde la nube de puntos correspondiente a la señal recibida (“p1”) aparece muy dispersa y sin agrupaciones claras, dificultando la identificación confiable de los símbolos QPSK. Comparado con la constelación original (“p3”), la degradación es evidente. Estos resultados confirman que el sistema opera en un entorno con ruido elevado, donde la probabilidad de error en la detección de símbolos se incrementa significativamente.

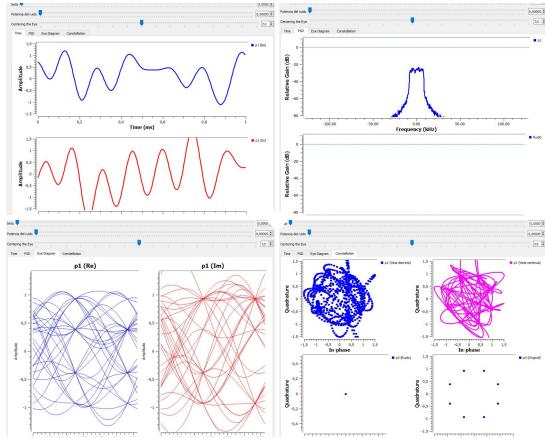


Figura 7. Degradación de la señal QPSK bajo alta potencia de ruido

2.8. Caso 5 - Degradación inicial de señal QPSK en presencia de ruido

En el caso 5, con la presencia de ruido, se observa cómo la señal QPSK comienza a deteriorarse respecto al escenario ideal como se muestra en la Fig.8. En el dominio del tiempo (superior izquierda), las componentes real e imaginaria de la señal presentan oscilaciones más irregulares, lo que evidencia la adición de ruido al canal. En el espectro de potencia (superior derecha), el piso de ruido se eleva de forma visible, aunque aún es posible identificar el lóbulo principal de la señal modulada. En los diagramas de ojo (inferior izquierda), la apertura característica se ve comprometida por la superposición de trayectorias, lo que indica un inicio de interferencia intersimbólica. Las constelaciones (inferior derecha) muestran una clara dispersión de los puntos correspondientes a la señal recibida (“p1”), aunque todavía es posible reconocer las agrupaciones en torno a los puntos ideales. La constelación del ruido (“p2”) forma una nube circular densa, mientras que la constelación original (“p3”) se



mantiene como referencia limpia. Este escenario representa una condición de canal con ruido moderado, en la que la calidad de la transmisión empieza a verse afectada, pero aún permite una recuperación parcial de los datos.

2.9. Caso 6 - Dispersión de constelación y degradación de señal QPSK en canal moderadamente ruidoso

En el caso 6 con ruido, la señal QPSK sufre una degradación significativa respecto al caso ideal. En el dominio del tiempo, se observan perturbaciones aleatorias; el espectro de potencia muestra un aumento del piso de ruido y una reducción del SNR. Los diagramas de ojo están cerrados, indicando fuerte interferencia intersimbólica, y en la constelación, los puntos recibidos se dispersan, dificultando la identificación de símbolos. Todo esto evi-
dencia una transmisión con alta probabilidad de error.

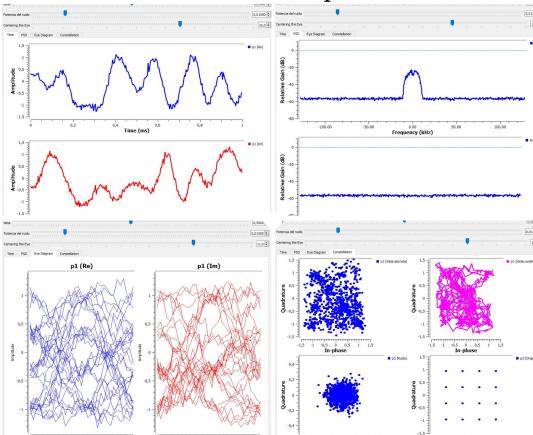


Figura 9. Dispersión de constelación y degradación de señal QPSK en canal moderadamente ruidoso

2.10. Caso 7 - Degradación severa de señal QPSK en canal altamente ruidoso

La Fig.10 muestra el impacto de un canal con alta potencia de ruido sobre una señal QPSK. En el dominio del tiempo, la señal presenta fuertes distorsiones; en frecuencia, el piso de ruido se eleva notablemente, reduciendo el contraste con el lóbulo principal. Los diagramas de ojo están completamente cerrados, evidenciando una alta interferencia intersimbólica. En la constelación,

los puntos recibidos están muy dispersos y desordenados, lo que indica un bajo SNR y una alta probabilidad de error en la detección de símbolos.

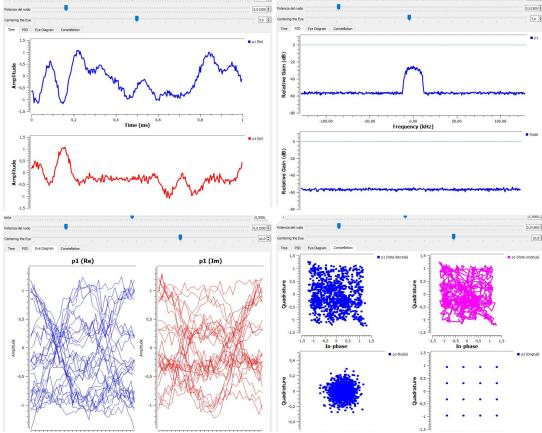


Figura 10. Degradación severa de señal QPSK en canal altamente ruidoso

3. Conclusiones

- Se comprobó que la calidad de la transmisión está estrechamente relacionada con la relación señal/ruido (SNR); a medida que esta disminuye, aumentan la dispersión en la constelación y la interferencia intersimbólica, lo cual compromete seriamente la integridad de los datos recibidos.
- El análisis de las señales moduladas bajo diferentes condiciones de ruido permitió evidenciar cómo la degradación progresiva del canal afecta directamente la forma de onda, el espectro y la representación en el plano de constelación, reduciendo la capacidad del sistema para recuperar correctamente la información transmitida.

Referencias

- [1] J. G. Proakis y M. Salehi, *Digital Communications*, 5^a ed., McGraw-Hill, 2007.
- [2] GNU Radio Project, *GNU Radio Documentation*, 2023. Disponible en: <https://wiki.gnuradio.org/>
- [3] M. K. Simon, S. M. Hinedi y W. C. Lindsey, *Digital Communication Techniques: Signal Design and Detection*, Prentice Hall, 1995.