

Figura 5,63.- Diagrama de los bloques empleados para el caso 8-PSK en bucle cerrado.

La salida del bloque *rx.m* pasa en esta ocasión por *mult2.m*, que realiza la multiplicación de la señal paso de baja modulada por un pequeño offset de frecuencia por la señal de salida del VCO, cuya frecuencia viene dada por el parámetro *nuestim*.

El bloque *muestreo2.m* simula la operación de muestreo de la señal $y(t)$, al igual que hacía el bloque *muestreo.m* en el sistema en bucle abierto. Los bloques *decbc.m*, *decbc8.m*, *err2.m*, *err28.m*, y *filtro2.m* tienen las mismas funciones que tenían en la simulación en bucle abierto los programas *decisor.m*, *decisor8.m*, *err.m*, *err8.m* y *filtro.m*. La razón de que haya una segunda versión de estos módulos de Matlab para operar en bucle cerrado es que la secuencia no es tratada entera de una vez, sino que las operaciones se realizan símbolo a símbolo para que en cada uno de ellos se pueda realizar la corrección de frecuencia.

El último programa es *vcobuc.m* en el sistema QPSK y *vcobuc8.m* en el sistema 8-PSK, que realiza la función del VCO del PLL; recibe como entrada el error de fase medio calculado por el filtro del bucle, *filtro2.m*. Este programa es el que se encarga de cerrar el lazo.

En esta ocasión, no se cumplen las ecuaciones (5.1) y (5.2), ya que la salida del VCO no es nula, por lo que volvemos a la expresión de f_i que nos daba la ecuación (3.38).

5.4.2.- SIMULACIÓN DEL SISTEMA EN BUCLE CERRADO. ESTUDIO DE LAS PRESTACIONES.

Para obtener la probabilidad de error de símbolo del sistema simulado realizamos un análisis de Montecarlo. Hemos obtenido esa probabilidad para ocho

valores de la relación señal a ruido, expresándola en función de la energía de símbolo. Para cada uno de esos valores introducimos una secuencia de símbolos con una longitud tal que el número de errores esperado sea de 100, esto es, el número de símbolos debe ser $L = 100 \cdot (p)^{-1}$, siendo p la probabilidad de error de símbolo nominal para una señal PSK diferencial. Si utilizamos una secuencia más corta los datos obtenidos podrían ser menos fiables; la necesidad de que la longitud deba ser como mínimo L limita mucho a la hora de hacer las simulaciones, pues a partir de determinados valores de la SNR la probabilidad de error es tan pequeña que haría crecer L mucho con el consiguiente aumento de la carga computacional de la simulación. Por esta razón sólo hemos simulado para valores de SNR tales que $L \leq 1.500.000$ símbolos, longitud que ya resulta bastante grande para equipos informáticos bastante potentes. Hay valores de SNR que resultarían más significativos, pero que sólo podemos analizar para secuencias más cortas de lo adecuado.

Podemos ver una demostración de los resultados para $SNR = 20$ dB en la figura 5.64, en la que comprobamos los errores de la fase (errores entre la fase del símbolo transmitido y la del símbolo recibido), para distintos valores de la desviación de frecuencia cuando ponemos en funcionamiento el bucle de recuperación de portadora en el sistema QPSK, para una secuencia de 1000 símbolos. Esta simulación no pretende simular la probabilidad de error, ya que resulta poco representativa para ese fin, pero puede dar una idea acerca del comportamiento del sistema. Hemos de aclarar que cuando hablamos de los errores entre símbolos transmitidos y recibidos nos referimos a los errores entre las secuencias PSK convencionales, esto es, comparamos la secuencia generada en el transmisor antes de codificarla diferencialmente y la obtenida en el receptor después de realizar la operación inversa, esto es, una vez extraída la señal PSK coherente a partir de la señal PSK diferencial. En las gráficas de la figura 5.64 comparamos las fases de ambas señales discretas por una razón muy sencilla. La fase es la característica de la señal que lleva la información a transmitir, luego los errores de fase entre la secuencia transmitida y la recibida se traducen en una degradación de la calidad de la recepción. Es por esto un punto de referencia para nosotros a la hora de analizar la probabilidad de error del sistema.

En la figura 5.65, se muestran, para una desviación de frecuencia del 5% en el sistema QPSK cuando $SNR = 20$ y la longitud de la secuencia es de 1000 símbolos, la salida del bloque generador de error *err2.m* (a), la variación de $\hat{\phi}$ a lo largo de la

simulación (b), la salida del filtro de media (c) y los errores entre la fase del símbolo transmitido y el recibido (d).

En las figuras 5.66 y 5.67 mostramos gráficas análogas a las anteriores obtenidas en simulaciones del sistema 8-PSK.

Se observa en las figuras 5.65 y 5.67 cómo el error de fase (la salida del generador de error) oscila alrededor de un valor estable una vez que el bucle ha enganchado la frecuencia (a), en lugar de describir la característica en forma de diente de sierra truncado que mostraba cuando el offset de frecuencia no era corregido. Esto indica que el sistema ha conseguido sincronizar la portadora. Recordemos que en las simulaciones en bucle abierto, cuando el offset de frecuencia era nulo, se podía apreciar un comportamiento parecido: la salida del generador de error oscilaba aleatoriamente a causa del ruido en torno a cero. En este caso el valor alrededor del cual oscila, también aleatoriamente, la salida del generador de error es distinto de cero por serlo también la desviación de frecuencia que afecta al receptor, pero el comportamiento es distinto que cuando no se recupera la frecuencia de la portadora. En efecto, se observa en 5.65 (b) y en 5.67 (b) cómo la desviación de frecuencia f_d va decreciendo. La salida del filtro de media tiende al valor alrededor del cual oscila la salida del generador de error, como se muestra en las gráficas 5.65 (c) y 5.67 (c), lo cual es lógico si tenemos en cuenta que la operación que realiza ese filtro es precisamente la media de la curva 5.65 (a), 5.67(a).

Cabe comentar un hecho que justifica la elección de una modulación PSK diferencial en lugar de una modulación PSK coherente: en la recepción no existe propagación de errores, como se aprecia en la figura 5.64 (d) y en las figuras 5.66 (c) y (d); esto es, no se dan situaciones de falso enganche, sino que por el contrario cuando el sistema sincroniza la portadora lo hace siempre sin error entre la fase del símbolo transmitido y el recibido. Esta era la razón por la que elegíamos este tipo de codificación. Cuando mostremos los resultados obtenidos en el análisis de Montecarlo veremos que el conseguir hacer el sistema inmune a la posibilidad de un falso enganche no ha sido gratuito; a cambio, hemos permitido que empeore la probabilidad de error del sistema, como ya vimos en el capítulo 3 cuando hablamos de la codificación PSK diferencial.

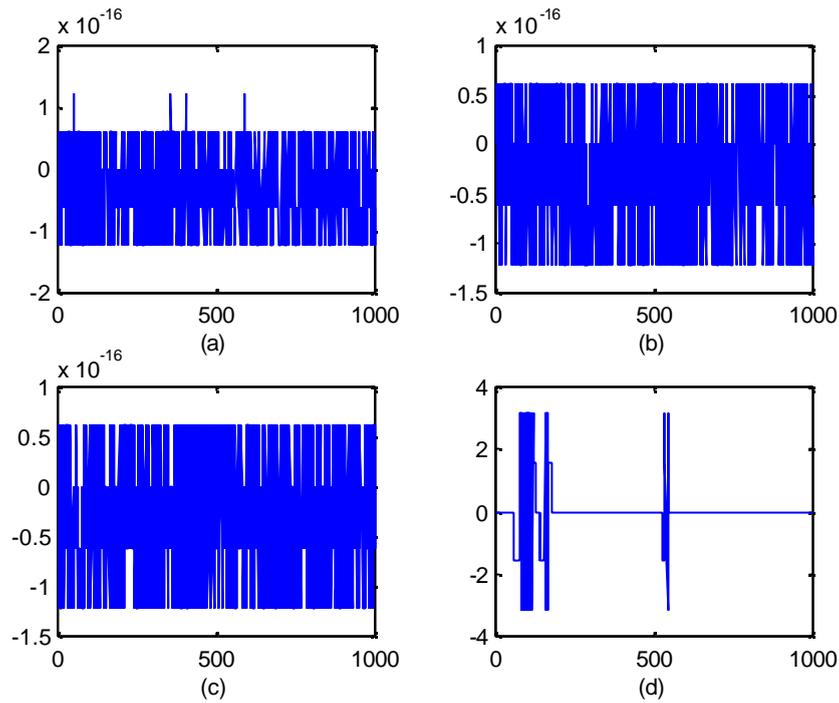


Figura 5.64.- Error entre la fase de la secuencia transmitida y la de la secuencia recibida para SNR=20 dB y: (a) $\nu=2.5\%$, (b) $\nu=5\%$, (c) $\nu=7.5\%$ y (d) $\nu=10\%$ (sistema QPSK).

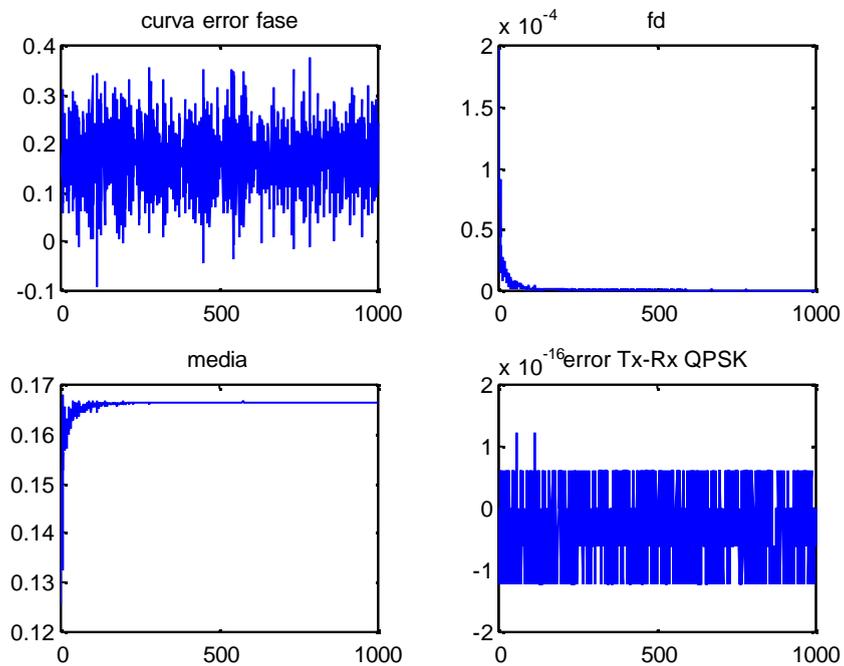


Figura 5.65.- Resultados de una simulación para SNR=20 dB y $\nu=5\%$ (sistema QPSK): (a) Salida del PFD, (b) f_d , (c) Salida del filtro de media, y (c) error entre la fase de la secuencia transmitida y de la recibida.

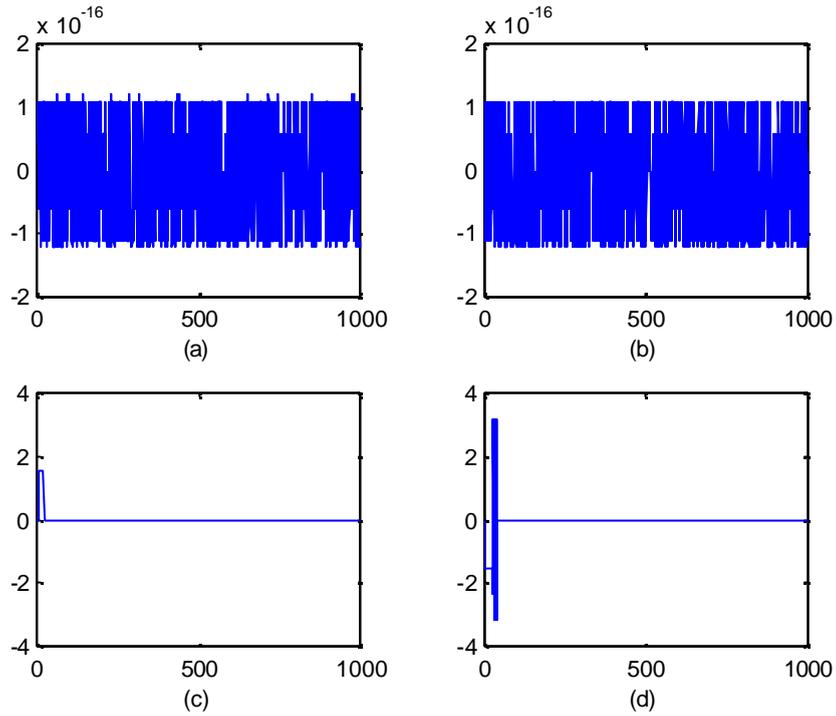


Figura 5.66.- Error entre la fase de la secuencia transmitida y la de la secuencia recibida para SNR=25 dB y: (a) $\nu=1.25\%$, (b) $\nu=2.5\%$, (c) $\nu=3.75\%$ y (d) $\nu=5\%$ (sistema 8-PSK).

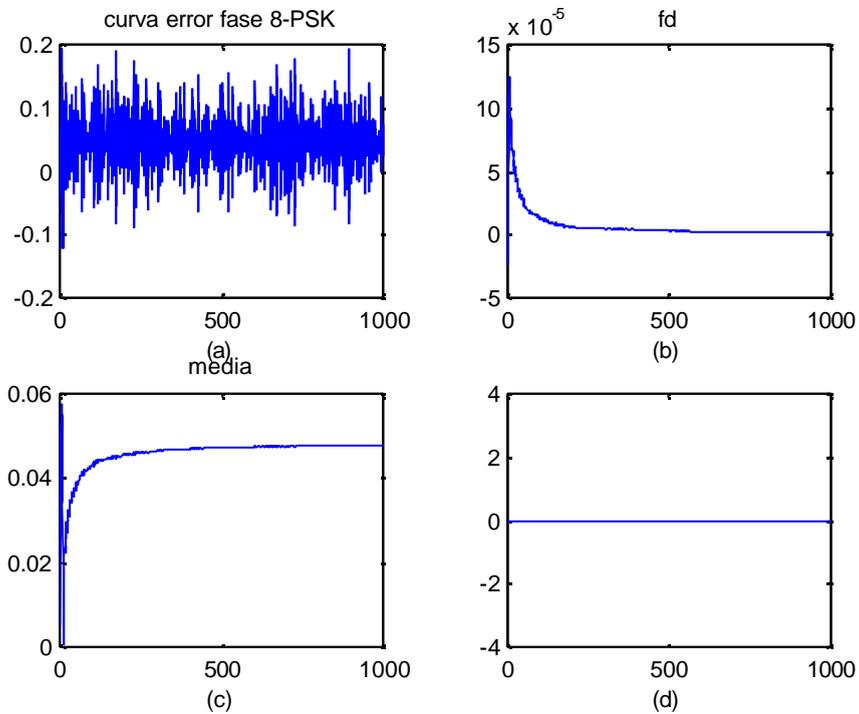


Figura 5.67.- Resultados de una simulación para SNR=25 dB y $\nu=2.5\%$ (sistema 8-PSK): (a) Salida del PFD, (b) f_d , (c) Salida del filtro de media, y (d) error entre la fase de la secuencia transmitida y de la recibida.

Procedemos a mostrar los resultados del análisis de Montecarlo para estimar la probabilidad de error de símbolo en el sistema. Se han simulado ocho puntos de cada una de las distintas curvas que se obtienen para $nu = 0\%$, $nu = 2.5\%$, $nu = 5\%$, $nu = 7.5\%$ y $nu = 10\%$ en el caso de la modulación QPSK, y se ha actuado de manera análoga en el caso de la modulación 8-PSK, para $nu = 0\%$, $nu = 1.25\%$, $nu = 2.5\%$, $nu = 3.75\%$ y $nu = 5\%$. Posteriormente, y con los resultados obtenidos en esas simulaciones, hemos efectuado una regresión para extrapolar los resultados a un mayor rango de valores de SNR, con el fin de obtener una curva continua de probabilidad de error y no sólo un conjunto de valores discretos. Los resultados de este procedimiento los mostramos en las figuras 5.68 y 5.69. Se puede comprobar en estas curvas cómo, a medida que crece el offset inicial de frecuencia, aumenta la probabilidad de error en el sistema, lo cual concuerda con las conclusiones que sacamos en el apartado 2.3.2 cuando apuntábamos que con una cierta potencia de ruido el sistema se vería más afectado cuanto mayor es el valor (absoluto) de f_d , por ser la ganancia del PFD (esto es, la característica $S(f_d)$) decreciente a medida que crece la magnitud de la desviación de frecuencia.

Podemos comparar en la figura 5.70 (QPSK) y en la 5.71 (8-PSK) la probabilidad de error cuando se utiliza nuestro bucle de adquisición de portadora y la probabilidad de error cuando no se utiliza ningún método de compensación de la frecuencia. La simulación para QPSK se ha hecho para un valor del offset de frecuencia de 2.5%, valor pequeño en comparación con el rango de adquisición, y otro del 7.5%. En la figura 5.71, las simulaciones se han efectuado para valores de f_d del 1.25% y del 3.75%. Vemos cómo la probabilidad de error en bucle abierto, esto es, sin recuperación de portadora, es mayor que en bucle cerrado; se observa que no existe una tendencia decreciente de la probabilidad de error en bucle abierto, sino que ésta se mantiene a pesar de ir aumentando la SNR. También podemos apreciar que la probabilidad de error es mayor si la desviación de frecuencia crece en bucle abierto, como ocurre en bucle cerrado.

Se demuestra, en definitiva, una notable mejora de las prestaciones del receptor si se emplea nuestro método para la sincronización de la frecuencia portadora con respecto a un receptor que no incorpore ningún método de compensación.

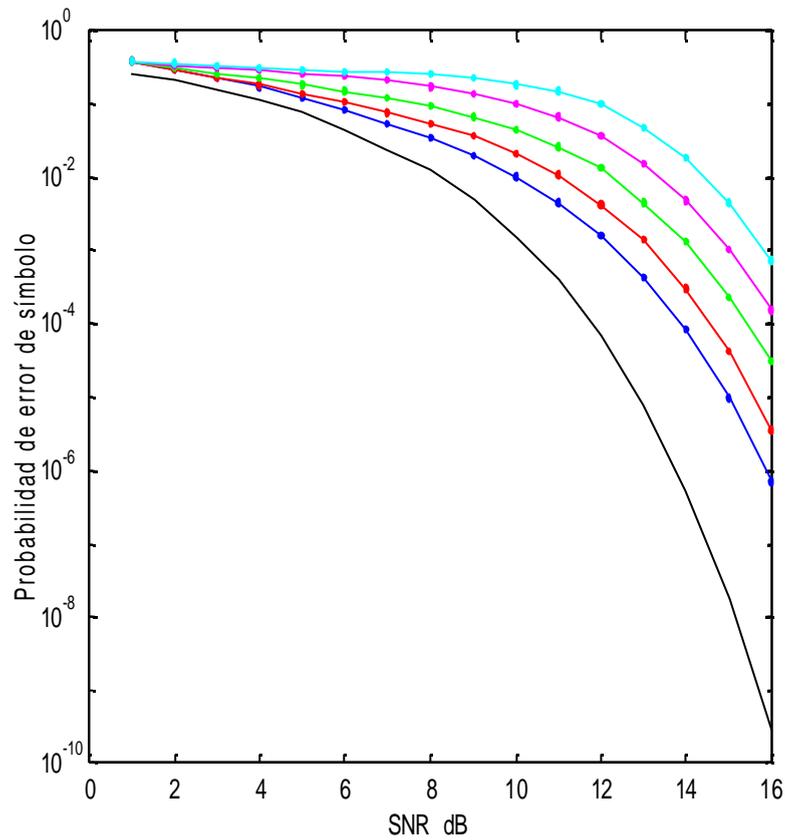


Figura 5.68.- Probabilidad de error de símbolo frente a SNR en sistema QPSK. —: Probabilidad de error teórica QPSK. —: probabilidad de error en simulación con $\nu=0\%$. —: Probabilidad de error en simulación con $\nu=2.5\%$. —: Probabilidad de error en simulación con $\nu=5\%$. —: Probabilidad de error en simulación con $\nu=7.5\%$. —: Probabilidad de error en simulación con $\nu=10\%$.

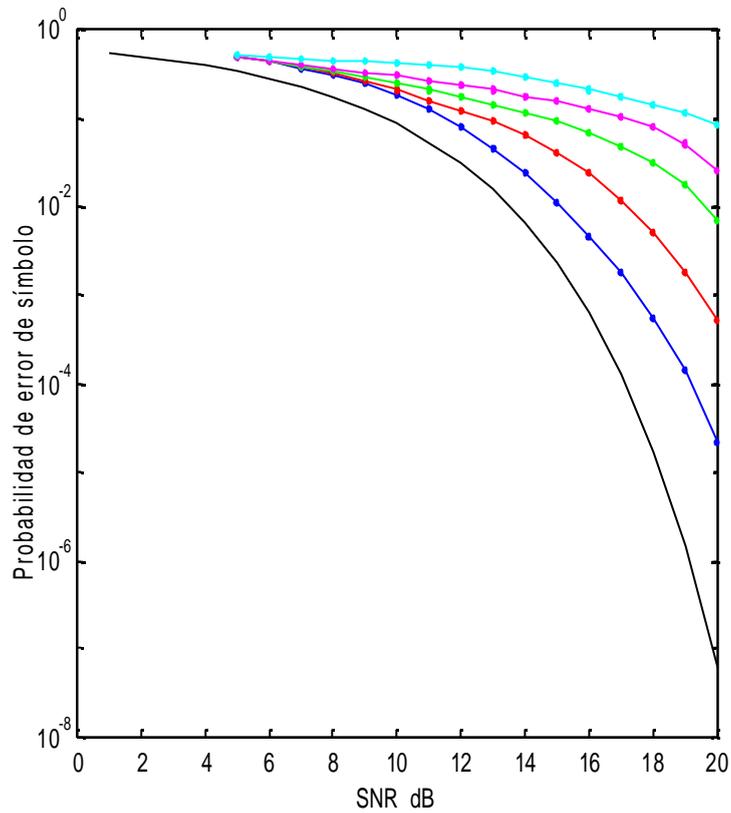


Figura 5.69.- Probabilidad de error de símbolo frente a SNR en sistema 8-PSK. —: Probabilidad de error teórica 8-PSK. —: probabilidad de error en simulación con $nu=0\%$. —: Probabilidad de error en simulación con $nu=1.25\%$. —: Probabilidad de error en simulación con $nu=2.5\%$. —: Probabilidad de error en simulación con $nu=3.75\%$. —: Probabilidad de error en simulación con $nu=5\%$.

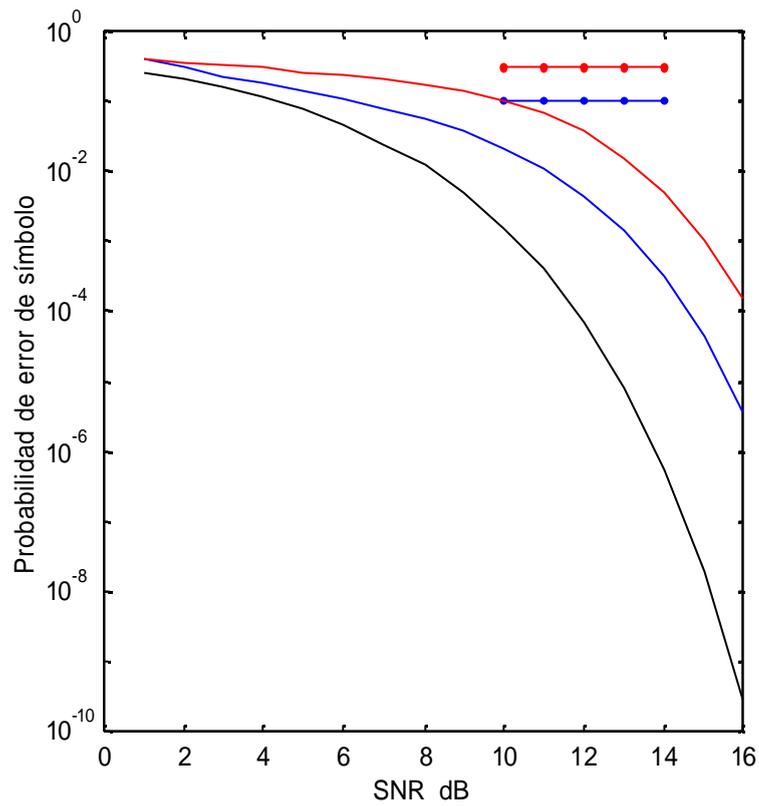


Figura 5.70.- Probabilidad de error de símbolo frente a SNR en un receptor QPSK sin compensación de la frecuencia portadora. —: Probabilidad de error teórica QPSK. Probabilidad de error obtenida en simulación con $\nu=2.5\%$, —: bucle cerrado, -.-: bucle abierto. Probabilidad de error en simulación con $\nu=7.5\%$, —: bucle cerrado, -.-: bucle abierto.

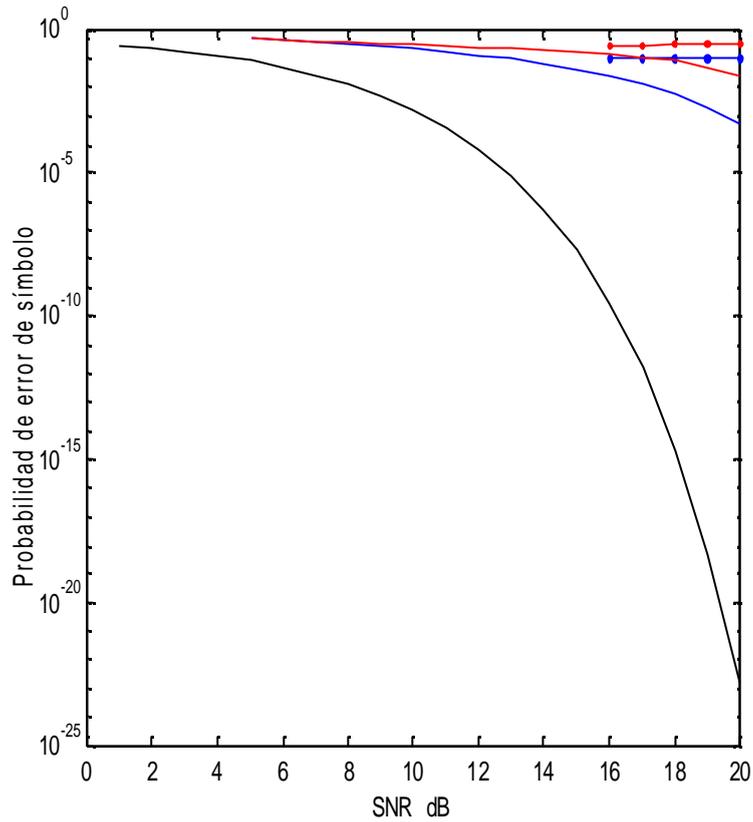


Figura 5.71.- Probabilidad de error de símbolo frente a SNR en un receptor 8-PSK sin compensación de la frecuencia portadora. —: Probabilidad de error teórica 8-PSK. Probabilidad de error obtenida en simulación con $nu=1.25\%$, —: bucle cerrado, - - : bucle abierto. Probabilidad de error en simulación con $nu=3.75\%$, —: bucle cerrado, - - : bucle abierto.

5.5.- RESUMEN.

Hemos realizado a lo largo de este capítulo la simulación de un PLL que incorpora el detector de fase y frecuencia propuesto y el análisis de las prestaciones del sistema simulado. Para realizarlo, comenzamos viendo el sistema en bucle abierto para analizar la ganancia del PFD que implementa el algoritmo de Sari-Moridi y el rango de frecuencias en el que ésta tiene el mismo signo que el offset f_{f} , situación en la que se basa la correcta actuación del bucle de recuperación. Tras esto, y eligiendo el PFD que hemos considerado más adecuado, hemos realizado un análisis de Montecarlo del bucle con el lazo ya cerrado, y hemos estudiado los resultados que arrojan estas simulaciones, comparando las curvas de probabilidad de error obtenidas para distintos offsets de frecuencia y también entre el receptor que incorpora nuestro método de recuperación de la portadora y un receptor que no tenga ningún mecanismo de adquisición.

Con esto, hemos concluido el objetivo de nuestro proyecto, haciendo valoraciones cualitativas sobre el comportamiento del sistema objeto de nuestro estudio. En el siguiente capítulo expondremos las conclusiones a las que hemos llegado acerca de su funcionamiento.

