Una vez hemos analizado el comportamiento del PFD, estamos en posición de ver qué ocurre a la salida del filtro del bucle, L(z). Vamos a representar la salida de este filtro frente a la desviación de frecuencia (S(f_d) frente a f_d). Para ello, hacemos una simulación del sistema en bucle abierto realizando un barrido de frecuencia, desde -12% hasta 12% para el sistema QPSK y desde –6% hasta 6% para el sistema 8-PSK. Hemos puesto en marcha esta simulación para tres valores distintos de SNR: 10, 17 y 30 dB, y en cada uno de estos casos para los tres valores de β que venimos estudiando.

Comenzaremos con la salida del filtro en el caso de las señales QPSK. En las condiciones de ruido en las que estamos simulando, la salida del generador de error depende de la secuencia de entrada (recordemos que no era así en el caso en el que SNR = 60 dB, para el cual la salida del PFD era periódica independientemente de la secuencia de entrada, esto es, no estaba distorsionada; esto lo podemos ver en las figuras en las que representábamos la salida de *err.m* y *err8.m* para nu \neq 0). Por lo tanto, no obtendremos una curva bien definida, sino que la salida será como se muestra en las figuras 5.42, 5.43 y 5.44, para valores de la SNR de 10, 17 y 30 dB respectivamente. Esas curvas se han obtenido con secuencias de 1000 símbolos de longitud, lo cual es evidente que no resulta representativo para conocer la característica S(f_d); tendremos que realizar entonces la simulación con un mayor número de símbolos, o bien repetir la misma simulación varias veces. En las figuras 5.45, 5.46 y 5.47 se aprecia una menor distorsión en la curva; se han obtenido haciendo la media de los resultados de cuatro simulaciones con secuencias de símbolos y ruido distintas, que es lo mismo que considerar la entrada de una sola secuencia de 4000 símbolos. Estos resultados tampoco nos dan una característica nítida del dispositivo en función de f_d, así que realizamos la simulación esta vez 100 veces, haciendo la media entre todas ellas, siendo el resultado el que vemos en las figuras 5.48, 5.49 y 5.50. Las simulaciones análogas para el sistema 8-PSK reflejan los resultados que se pueden observar en las figuras 5.51, 5.52 y 5.53 (1 iteración de 1000 símbolos), 5.54, 5.55 y 5.56 (4 iteraciones) y 5.57, 5.58 y 5.59 (100 iteraciones en las dos últimas y 300 en la anterior; explicaremos porqué para obtener la figura 5.57 se ha efectuado un mayor número de iteraciones cuando comentemos los resultados). Cada iteración corresponde a una simulación en la que existe una secuencia de entrada de 1000 símbolos, igual que en el caso QPSK.



Figura 5.42.- Salida del filtro de media en el sistema QPSK con SNR = 10 dB en función de la desviación de frecuencia f_d, para una secuencia de 1000 símbolos, realizando 1 iteración.



Figura 5.43.- Salida del filtro de media en el sistema QPSK con SNR = 17 dB en función de la desviación de frecuencia f_d, para una secuencia de 1000 símbolos, realizando 1 iteración.



Figura 5.44.- Salida del filtro de media en el sistema QPSK con SNR = 30 dB en función de la desviación de frecuencia f_d, para una secuencia de 1000 símbolos, realizando 1 iteración.



Figura 5.45.- Salida del filtro de media en el sistema QPSK con SNR = 10 dB en función de la desviación de frecuencia f_d, para una secuencia de 1000 símbolos, realizando 4 iteraciones.



Figura 5.46.- Salida del filtro de media en el sistema QPSK con SNR = 17 dB en función de la desviación de frecuencia f_d, para una secuencia de 1000 símbolos, realizando 4 iteraciones.



Figura 5.47.- Salida del filtro de media en el sistema QPSK con SNR = 30 dB en función de la desviación de frecuencia f_d, para una secuencia de 1000 símbolos, realizando 4 iteraciones.



Figura 5.48.- Salida del filtro de media en el sistema QPSK con SNR = 10 dB en función de la desviación de frecuencia f_d, para una secuencia de 1000 símbolos, realizando 100 iteraciones.



Figura 5.49.- Salida del filtro de media en el sistema QPSK con SNR = 17 dB en función de la desviación de frecuencia f_d, para una secuencia de 1000 símbolos, realizando 100 iteraciones.



Figura 5.50.- Salida del filtro de media en el sistema QPSK con SNR = 30 dB en función de la desviación de frecuencia f_d, para una secuencia de 1000 símbolos, realizando 100 iteraciones.



Figura 5.51.- Salida del filtro de media en el sistema 8-PSK con SNR = 10 dB en función de la desviación de frecuencia f_d, para una secuencia de 1000 símbolos, realizando 1 iteración.



Figura 5.52.- Salida del filtro de media en el sistema 8-PSK con SNR = 17 dB en función de la desviación de frecuencia f_d, para una secuencia de 1000 símbolos, realizando 1 iteración.



Figura 5.53.- Salida del filtro de media en el sistema 8-PSK con SNR = 30 dB en función de la desviación de frecuencia f_d, para una secuencia de 1000 símbolos, realizando 1 iteración.



Figura 5.54.- Salida del filtro de media en el sistema 8-PSK con SNR = 10 dB en función de la desviación de frecuencia f_d, para una secuencia de 1000 símbolos, realizando 4 iteraciones.



Figura 5.55.- Salida del filtro de media en el sistema 8-PSK con SNR = 17 dB en función de la desviación de frecuencia f_d, para una secuencia de 1000 símbolos, realizando 4 iteraciones.



Figura 5.56.- Salida del filtro de media en el sistema 8-PSK con SNR = 30 dB en función de la desviación de frecuencia f_d, para una secuencia de 1000 símbolos, realizando 4 iteraciones.



Figura 5.57.- Salida del filtro de media en el sistema 8-PSK con SNR = 10 dB en función de la desviación de frecuencia f_d, para una secuencia de 1000 símbolos, realizando 300 iteraciones.



Figura 5.58.- Salida del filtro de media en el sistema 8-PSK con SNR = 17 dB en función de la desviación de frecuencia f_d, para una secuencia de 1000 símbolos, realizando 100 iteraciones.



Figura 5.59.- Salida del filtro de media en el sistema 8-PSK con SNR = 30 dB en función de la desviación de frecuencia f_d, para una secuencia de 1000 símbolos, realizando 100 iteraciones.

En las gráficas anteriores hemos representado en rojo la curva $S(f_d)$ correspondiente al detector de fase con *beta* = 0.25, la curva azul corresponde al sistema en el que *beta* = 0.5 y la verde representa la salida del filtro de media cuando *beta* = 0.75. En la figura 4.11 veíamos la misma característica de salida del PFD, característica proporcionada por los autores del artículo [5]. En aquella ocasión el detector de fase con una salida en forma de diente de sierra. Recordemos que en esa figura se comparaban varias curvas en función de un parámetro, α , mientras que nosotros utilizamos un parámetro distinto, *beta*. Para hallar la relación entre ambos nos fijamos en la figura 5.60. Hemos representado una de las ventanas determinada por el parámetro α que teníamos en la figura 4.8, esta vez girándola 45°, de forma que el ángulo θ queda definido por el valor de α . El módulo de los puntos sobre el círculo es 1; el punto a estará dado por:

$$a = \cos \boldsymbol{q} + j \operatorname{sen}(\boldsymbol{q}) \tag{5.4}$$

Además, el punto a está en la recta que cumple la ecuación.

$$y = x - \alpha \sqrt{2} \tag{5.5}$$

Por lo que él también la cumplirá, verificándose:

$$\cos(\theta) = \cos(\beta \cdot \pi/4) = x$$

$$\sin(\theta) = \sin(\beta \cdot \pi/4) = x - \alpha\sqrt{2}$$
(5.6)

para el caso de las señales QPSK. Para las señales 8-PSK, hallamos la relación entre α y d (figura 5.61), que resulta ser:

$$\alpha = d \operatorname{sen}(\pi \,/\, 8) \tag{5.7}$$

La ecuación análoga a la expresión (5.5) para 8-PSK será

$$y = 0.414x - \alpha / sen(\pi / 8)$$
 (5.8)

y las ecuaciones equivalentes a las (5.6) en este sistema serán:

$$\cos(\theta) = \cos(\beta \cdot \pi/8) = x$$

$$\sin(\theta) = \sin(\beta \cdot \pi/8) = 0.414x - \alpha/\sin(\pi/8)$$
(5.9)

Con lo cual dado un valor de β , que se corresponde con el parámetro *beta* en nuestras simulaciones, podemos obtener el valor de α correspondiente. Para los valores que nosotros hemos escogido, tenemos los valores de α recogidos en la tabla 5.5 para el caso QPSK y en la tabla 5.6 para el caso 8-PSK.

Fijémonos en las figuras correspondientes a 100 (y 300) iteraciones, que son las que consideramos que representan la característica de salida del detector. Lo primero que podemos apreciar es como, a medida que aumenta la SNR, es decir, cuando tendemos a una situación ideal, la gráfica tiene un pico más pronunciado en lugar de tender a una característica plana como veíamos en la figura 4.11; ello es natural si pensamos que para desviaciones de frecuencia más pequeñas los picos de la salida del generador de error son más anchos, luego los periodos de seguimiento están más separados; esto hará que la media sea más alta que cuando los periodos de seguimiento se repiten más a menudo y por tanto la media se hace sobre una secuencia que tiene más elementos negativos. Esto va ligado, entonces, al tipo de detector de fase que hemos utilizado, distinto del utilizado en el sistema cuya característica de salida se representa en la figura 4.11. Además de utilizar un detector de fase distinto, nuestro sistema está adaptado a señales PSK, mientras que en el de la citada figura las señales recibidas eran de naturaleza 16-QAM.

La amplitud de la característica es menor en el caso de un receptor 8-PSK que en el caso de un receptor QPSK, lo cual es lógico si tenemos en cuenta que la salida del filtro no es más que la media del error de fase de la secuencia, error que está acotado entre $\pi/4$ y $-\pi/4$ en el caso QPSK y entre $\pi/8$ y $-\pi/8$ en el caso 8-PSK. Al tener la salida menor amplitud para el caso en que M = 8 obtendremos un rango de adquisición menor, aproximadamente de la mitad.

También se puede observar como la presencia del ruido hace disminuir la amplitud de la característica, llegando hasta el extremo de hacer la media debida al error de fase de la señal menor que la media debida al ruido en el caso de un sistema 8-PSK cuando SNR = 10 dB. Así, para una sola iteración de la simulación, es indistinguible la

forma de esa curva, está completamente enmascarada por el ruido. Si hacemos 100 iteraciones para este caso, simulación que no hemos representado en ninguna gráfica, la distorsión que aparece deja distinguir a duras penas la forma de la curva, por lo cual optamos por una simulación con 300 iteraciones. Para una SNR de 10 decibelios, por tanto, el sistema 8-PSK no responde debidamente, no funciona de un modo adecuado por tener la característica de salida del PFD una amplitud menor que la del ruido (para el sistema QPSK sí se obtiene una curva más definida con 10 dB de relación señal a ruido, ya que la amplitud de S(f_d) es mayor para esta modulación). Existe entonces un límite para la SNR por debajo del cual el sistema se descontrola. También es lógico pensar, por los mismos motivos, que cuando la SNR es baja aunque por encima de ese límite que mencionamos la amplitud de la media del ruido sea tal que de lugar a un número de errores en el bucle ya cerrado mayor del que tendríamos en el caso de que no necesitásemos un bucle de recuperación (esto es, en el caso de sincronización perfecta), y que este aumento del número de errores será mayor donde la curva es más baja, esto es, cuando la desviación de frecuencia sea mayor.

Un último aspecto que no es igual en la figura 4.11 y en nuestras simulaciones es la aparición de picos que deforman la curva a medida que la SNR va aumentando, y que se van acentuando a medida que crece el número de iteraciones que hacemos. Estas dos direcciones en las que tienden a aparecer esos picos indican que no se deben a la presencia de ruido, en contra de lo que en un principio se podría suponer. El motivo hay que buscarlo en las irregularidades de las curvas a la salida del generador de error, que como comentábamos anteriormente no describían una característica en forma de sierra perfecta y que, por tanto, darán lugar a desniveles en la gráfica de salida del filtro de media. Estos desniveles aparecerán en los puntos de desviación de frecuencia para los cuales la salida del generador de error sea muy distinta de las correspondientes a los valores de desviación de frecuencia próximos. La presencia de ruido enmascara esos picos y hace que para una SNR menor no apreciemos la influencia de las irregularidades en la salida del bloque generador de error.

	α
<i>beta</i> = 0.25	0.55
beta = 0.5	0.38
<i>beta</i> = 0.75	0.2

Tabla 5.5.- Valores del parámetro **a** en función de los valores escogidos para **b** en el sistema QPSK.

	α
<i>beta</i> = 0.25	0.12
<i>beta</i> = 0.5	0.08
<i>beta</i> = 0.75	0.04

Tabla 5.5.- Valores del parámetro **a** en función de los valores escogidos para **b** en el sistema 8-PSK.



Figura 5.60.- Relación entre **a** y **b** en sistemas QPSK.



Figura 5.61.- Relación entre **a** y **b** en sistemas 8-PSK.

Los valores que se utilizan del parámetro α en los análisis expuestos en el artículo de Sari y Moridi no resultan muy representativos para nosotros; la distancia d representada en la figura 5.60 saldría del rango (0,1) posible si $\alpha = 0.75$, y la d de la figura 5.61 sale de este rango si $\alpha = 0.5$ y si $\alpha = 0.75$, siendo mayor de 0.5 para el otro valor de α considerado por los autores. Así pues, no entra dentro de nuestras pretensiones analizar lo adecuado de estos valores si la señal es QAM, como es el caso del experimento de laboratorio expuesto en el artículo, pero parece una opción mejor olvidarnos de ellos para nuestras modulaciones; la otra opción sería aumentar la energía de símbolo para adaptarla a esos valores de α .

La elección de los valores de *beta* que se han utilizado en las simulaciones se ha realizado considerando subintervalos iguales dentro del intervalo (0,1), que corresponde con el rango de posibles valores de *beta*. Para estos valores, obtenemos curvas cuyo comportamiento es distinto; la correspondiente a *beta* = 0.25, la curva roja, tiene el signo de la desviación de frecuencia en un rango menor que las otras para los dos sistemas PSK y con cualquier SNR, esto es, su rango de adquisición es menor, por lo cual no elegiremos este valor para simular el bucle de recuperación de portadora en lazo cerrado. Las otras dos características presentan un rango de adquisición de

aproximadamente el 12% en el receptor QPSK y del 6% en el 8-PSK. Para las simulaciones en bucle cerrado escogeremos el valor beta = 0.5, que tiene un rango de adquisición aproximadamente igual al que se obtiene con beta = 0.75 y además presenta una mayor ganancia para frecuencias bajas.

Con todo esto ya tenemos el análisis en el que basamos las simulaciones en bucle cerrado, en las cuales comprobaremos las probabilidades de error de símbolo del bucle de recuperación de portadora para distintos valores del offset de frecuencia dentro del rango de adquisición del dispositivo.

5.4.- SISTEMA EN BUCLE CERRADO. PRESTACIONES.

Para la simulación del sistema en bucle cerrado, no todos los programas de Matlab utilizados en la simulación en bucle abierto son válidos, realizándose algunas operaciones con bloques específicos para este caso. Nuestro objetivo es obtener la probabilidad de error del receptor para distintas desviaciones de frecuencia.

5.4.1.-REALIZACIÓN DEL SISTEMA EN BUCLE CERRADO.

Comenzamos viendo las figuras 5.62 y 5.63, en las que representamos mediante un diagrama de bloques los distintos programas que intervienen. Como en las simulaciones en bucle abierto, cada programa realiza la función de un dispositivo concreto colocado en el bucle.



Figura 5,62.- Diagrama de los bloques empleados para el caso QPSK en bucle cerrado.