

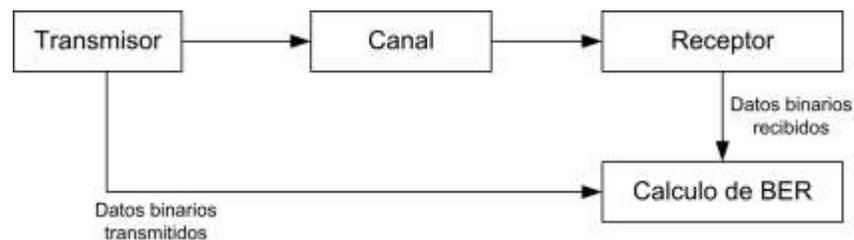
## ANEXO A

### SIMULACION DE UN SISTEMA DE ESPECTRO ENSANCHADO POR SALTO EN FRECUENCIA

Con el objetivo de tener un referente teórico de la Tasa de Error de Bit (BER, *Bit Error Rate*) de un sistema de Espectro ensanchado por Salto en Frecuencia (FHSS, *Frequency Hopping Spread Sepctrum*) y la comparación con mediciones prácticas de BER, fue necesario simular éste tipo de sistemas.

En el presente anexo se describe la simulación de un sistema FHSS en la herramienta de Simulink® de Matlab®, donde se simula en el nivel físico en banda base<sup>1</sup>. Simulink provee bloques para el modelado de canales, técnicas de modulación, técnicas de codificación de canal, entre otros que permiten modelar sistemas de comunicaciones.

El esquema general del sistema implementado se muestra en la Figura A.1.



**Figura A.1 Modelo general del sistema de comunicaciones**

#### A.1 DESCRIPCION DE UN SISTEMA FHSS.

FHSS es considerada como técnica de espectro ensanchado porque la información es transmitida de manera secuencial, en un amplio espectro de radiofrecuencias. El proceso

---

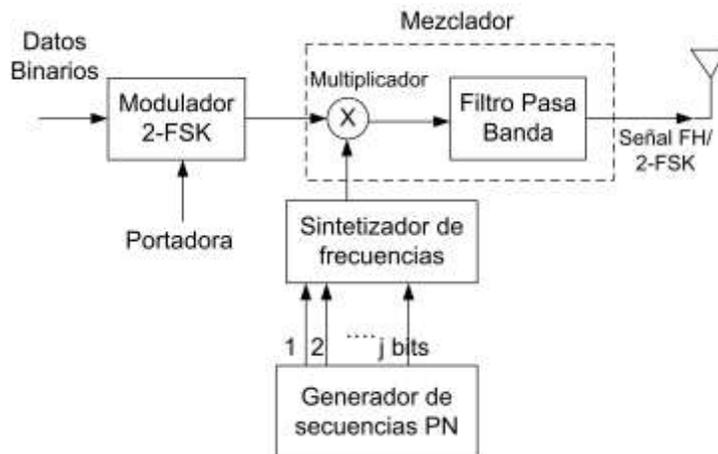
<sup>1</sup> Para simular una señal RF se necesita un gran número de muestras por lo tanto utilizar los valores nominales de frecuencia incrementa considerablemente las capacidades computacionales, por este motivo las señales RF son representadas por una señal analítica en banda base mediante el método de envolvente compleja la cual permite caracterizar la señal en magnitud y fase [38] [39].

de salto en frecuencia es un cambio periódico de la frecuencia de la portadora de la señal transmitida, la secuencia de las frecuencias de la portadora se define como *patrón de saltos de frecuencia*, cuyos saltos ocurren en un rango de frecuencias denominada *banda de saltos*. [37]

A continuación se hace una descripción general de cada uno de los bloques que conforman estos sistemas con el objetivo de establecer las bases para realizar la simulación del sistema. En las Figura A.2 y Figura A.3 se muestran los esquemas de transmisión y recepción en la técnica FHSS, que se trató en la sección 1.2.2.1.

### A.1.1 El transmisor FHSS.

El transmisor consta de una primera etapa de modulación, los esquemas de modulación que son usados en FHSS requieren estabilidad en frecuencia y fase debido a la complejidad de sus procesos de sincronización, por lo cual generalmente se prefiere los esquemas de Modulación por Cambio de Frecuencia M-ario (M-FSK, M-ary Frequency Shift Keying) [3]. En la simulación el esquema de modulación seleccionado es 2-FSK.



**Figura A.2 Diagrama en bloques de un sistema de transmisor FHSS con modulación 2-FSK.**

La señal resultante del bloque de modulación es multiplicada con la frecuencia de salto proporcionada por el sintetizador de acuerdo a un patrón de saltos, luego la señal de salida es filtrada en pasa banda con el fin de dejar pasar solo las componentes principales de frecuencia del proceso de la multiplicación rechazando algunos armónicos y productos no deseados.

La frecuencia de salto establecida por el sintetizador es definida por una secuencia entregada por un generador de secuencias pseudoaleatorias, las cuales son secuencias binarias periódicas con forma de onda similar al ruido [3].

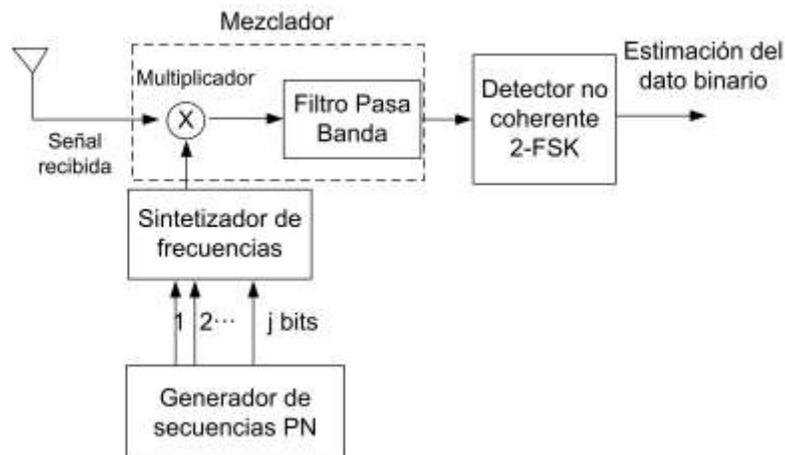
### A.1.2 Canal de Comunicaciones.

En las comunicaciones por radiofrecuencias (RF), el canal de comunicaciones presenta alteraciones que disminuyen el desempeño de las comunicaciones de alta velocidad [21]. En el canal la señal de datos de RF está expuesta a pérdidas de propagación por efecto de la disipación de la potencia radiada por el transmisor así como también características de la propagación del canal [21].

### A.1.3 Receptor FHSS

En el receptor FHSS se debe recuperar la señal de información que fue transmitida en diferentes frecuencias de portadora. Inicialmente la señal de RF se trasladada a frecuencias más bajas adecuadas para el procesamiento.

Los saltos en frecuencia de la señal recibida son removidos mediante un mezclador que opera dicha señal utilizando la frecuencia generada por el sintetizador local, el cual es controlado utilizando la misma secuencia pseudoaleatoria de forma sincronizada con el transmisor. La señal resultante se adecua en un filtro pasa banda y luego es procesada por un detector no coherente 2-FSK [3].



**Figura A.3 Diagrama en bloques de un sistema receptor de FHSS con modulación 2-FSK**

## A.2 DESCRIPCION DE LA SIMULACION DEL SISTEMA FHSS

La simulación tanto del transmisor como del receptor FHSS abarca el estudio de dos modos de funcionamiento de acuerdo a los dos modos de operación que tiene el kit de Adeunis RF descrito en el Capítulo 2.

Para Banda Angosta (NB, *Narrow Band*) la velocidad de transmisión de datos es 10 Kbps y la desviación de frecuencia es  $2\Delta f_{NB} = 28.5 \text{ KHz}$ . De manera que según la ecuación 1.10, el índice de modulación  $IM_{NB} = 1.25$ .

Para Banda Ancha (WB, *Wide Band*) la velocidad de transmisión de datos es de 57.6 Kbps y la desviación de frecuencia  $2\Delta f_{WB} = 49.9 \text{ KHz}$ . El índice de modulación calculado según la ecuación 1.10 es de  $IM_{WB} = 0.434$ .

### A.2.1 Implementación del transmisor en FHSS.

Para simular la fuente de información, se usó un generador de Bernoulli con una tasa de muestreo de 1/10000 (para NB) y de 1/57600 (para WB) y con una probabilidad de generación de cero igual 0.5, con el fin de generar una serie de unos y ceros con la misma probabilidad y el muestreo adecuado para simular tanto el modo de NB o WB.

Luego la señal se transfiere a un modulador GFSK<sup>2</sup> con un índice de modulación que depende del modo de operación. La señal modulada se multiplica con la generada por el sintetizador con lo cual la señal se traslada a la frecuencia de transmisión.

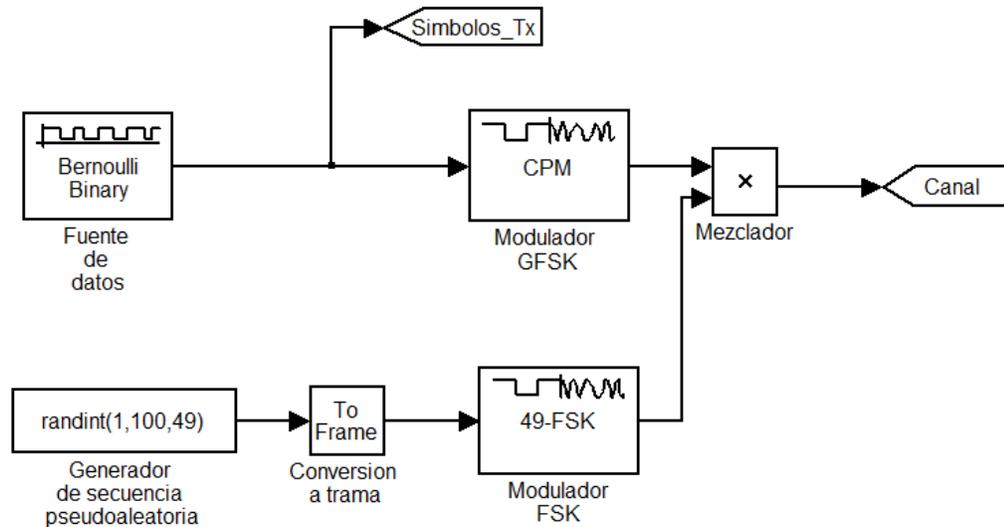
El sintetizado está conformado por un modulador 49-FSK, que distribuye los canales alrededor de una frecuencia central igual a 0KHz con una separación entre canales de 500 KHz, de esta manera los enteros entre 0 y 23 generan portadoras entre -12000KHz y -500KHz en la parte baja de la banda y los valores entre 24 y 48 generan portadoras entre 0 KHz y 12000KHz para la parte alta de la banda. El sintetizador define la frecuencia de salida según un número aleatorio proporcionado por un generador de números aleatorios enteros entre 0 y 49, el cual representa el generador de secuencias pseudoaleatorias.

La señal resultante del sintetizador se traslada al canal AWGN. Con el fin de dar mayor claridad se define como “portadora” a la frecuencia de transmisión teniendo en cuenta

---

<sup>2</sup> Aunque el sistema de comunicación de los dispositivos de Adeunis RF usa la modulación FSK, para la simulación es recomendado usar un modulador GFSK dado que ésta modulación funciona mejor en el canal AWGN en Simulink, además con este modulador si es posible establecer el índice de modulación para cada modo de funcionamiento (NB, WB) y también el factor BT (ancho de banda por tiempo proporcionado por el fabricante).

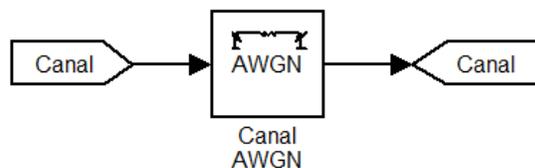
que en simulación no se trabaja con los valores nominales de frecuencia y el procesamiento se realiza a nivel de banda base.



**Figura A.4 Modelo de simulación del transmisor FHSS**

### A.2.2 Implementación del canal de comunicaciones

Luego del mezclador la señal llega a un bloque que simula las condiciones de un canal afectado por Ruido Aditivo Blanco Gaussiano (AWGN, Additive white Gaussian noise ) el cual permite la evaluación de la relación  $E_b/N_0$ . En realidad el canal de comunicaciones es afectado por fenómenos adicionales muy diversos pero en este caso es necesario simplificar el modelo para su análisis, el resultado de este proceso se entrega a la etapa de recepción. El canal de comunicaciones simulado se indica en la Figura A.5.



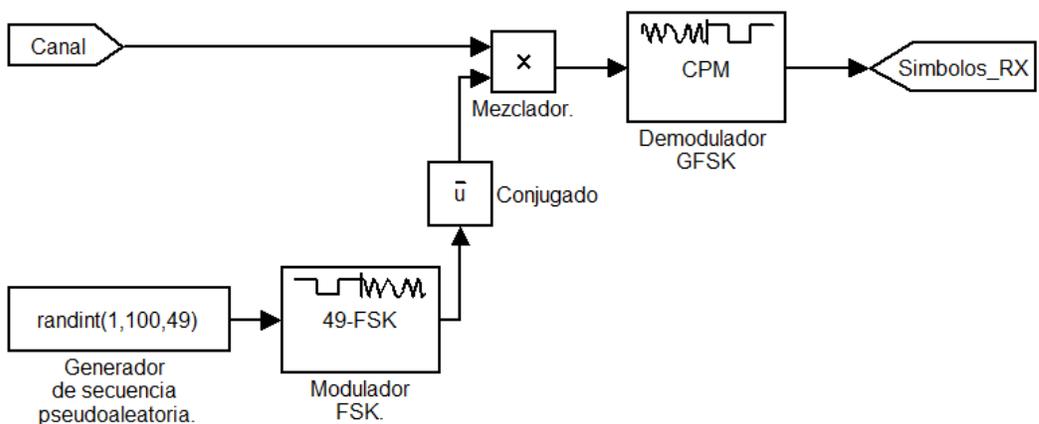
**Figura A.5 Modelo de simulación de un canal AWGN**

### A.2.3 Implementación del receptor en FHSS.

En la recepción de la Figura A.6 se realiza un proceso inverso al utilizado en transmisión, la señal del canal AWGN se multiplica con la señal generada por el sintetizador de

acuerdo al el generador de secuencias pseudoaleatorias, que es el mismo para ambos lados de la comunicación. La frecuencia de la señal recibida debe ser similar a la generada por el modulador 49-FSK para que la señal de información sea correctamente capturada en el receptor.

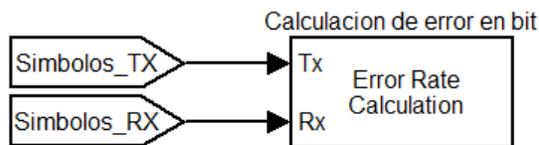
La señal resultante pasa a un demodulador GFSK configurado con parámetros similares a los utilizados por el transmisor, donde la información se recupera y pasa al proceso de cálculo de la BER.



**Figura A.6 Modelo de simulación del receptor FHSS**

### A.2.4 Calculo de BER

Para determinar la BER, se compara la información original transmitida con la información recuperada. Estas medidas se realizan para las diferentes condiciones del canal. El bloque que realiza este proceso se indica en la Figura A.7



**Figura A.7 Cálculo de errores en bit**

## A.3 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL SISTEMA FHSS

El proceso de simulación fue hecho en una herramienta para el cálculo de la tasa de error de bit denominada Bertool de Matlab®, la cual permite calcular la BER con respecto a

Eb/No de un modelo diseñado. El tiempo de simulación depende de la velocidad y cantidad de los datos que se desean graficar.

### A.3.1 Configuración de los bloques.

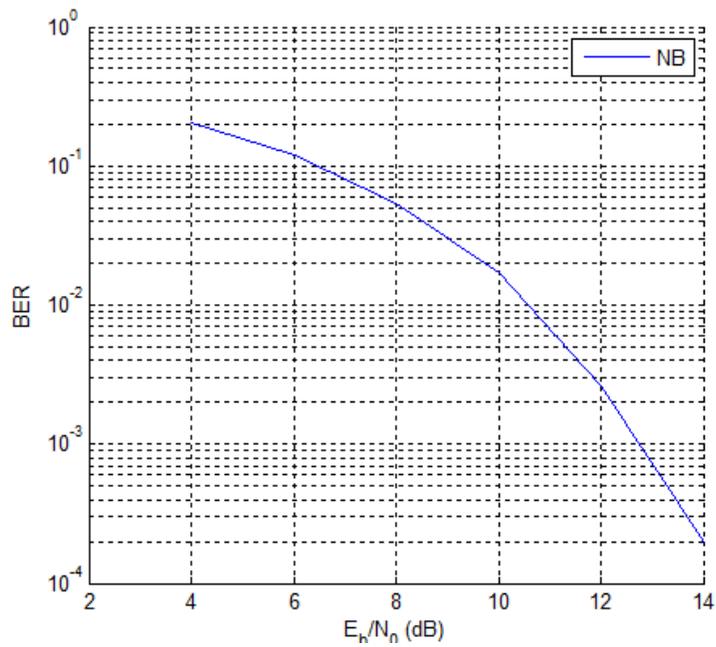
En la Tabla A-1 se indica la forma de configuración de los principales parámetros de los bloques del sistema de la Figura A.4 y Figura A.6.

**Tabla A-1 Configuración de los bloques del modelo.**

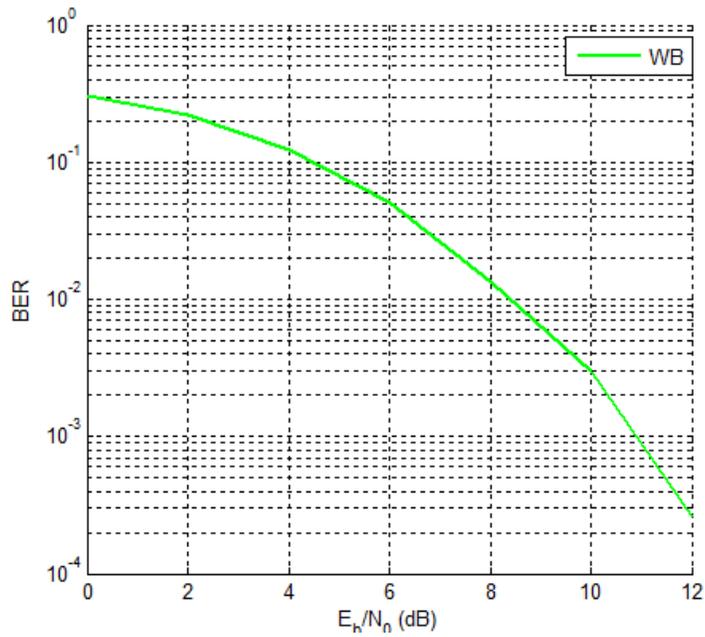
BLOQUE	NB	WB
<b>Generador de Bernoulli.</b>		
Probabilidad de un cero	0.5	0.5
Tiempo de muestra	10e-4	57.6e-4
<b>Modulador GFSK.</b>		
Numero M-ario	2	2
Índice de modulación	1.4	0.43
Muestras por símbolo	100	2
<b>Modulador FSK:</b>		
Numero M-ario	49	49
Separación de frecuencia	500 KHz	500 KHz
Muestras por símbolo	100	100
<b>Generador PN:</b>		
Tiempo de muestra	0.4 s	0.4s
<b>Canal AWGN:</b>		
Modo	Eb / No	Eb / No
Periodo de símbolo	10e-4	57.6e-4
<b>Demodulador GFSK:</b>		
Numero M-ario	2	2
Índice de modulación	1.4	0.43
Muestras por símbolo	100	2

### A.3.2 Curvas de desempeño obtenidas

Con la simulación se obtuvo las curvas de desempeño en un modelo ideal FHSS tanto para WB como para NB y se indican en las Figura A.8 y Figura A.9.



**Figura A.8 Desempeño de un sistema ideal de FHSS en espacio libre para banda angosta**



**Figura A.9 Desempeño de un sistema ideal de FHSS en espacio libre para banda ancha**

