



UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR  
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA Y CIRCUITOS  
Trimestre Septiembre-Diciembre 2016  
EC3423 COMUNICACIONES II  
Prof. Renny Badra [renny@usb.ve](mailto:renny@usb.ve)

## PRÁCTICA 3. PROBABILIDAD DE ERROR

### OBJETIVOS

- Simular un Sistema digital de transmisión y detección sobre un canal con ruido aditivo blanco gaussiano AWGN (Additive White Gaussian Noise).
- Simular el funcionamiento de un filtro adaptado.
- Observar el comportamiento de la probabilidad de error de bit para diferentes relaciones  $E_b/N_0$ .

### SOFTWARE

- Matlab.

### REFERENCIAS

- Carlson B., *Communication Systems*, 4ª Edición, McGraw-Hill, New York, 2002.
- Haykin S., *Communication Systems*, 4ª Edición, John Wiley & Sons, New York.
- Sklar B., *Digital Communications: Fundamentals and Applications*, 2ª Edición, Prentice Hall, New Jersey, 2001.
- Esta práctica está basada en la Guía de Laboratorio de Comunicaciones del Prof. Renny Badra.

### REVISIÓN TEÓRICA

Una señal binaria se denomina antípoda cuando la forma de pulso que se usa para representar los “1” es la misma que se emplea para representar los “0” salvo por un cambio de signo. Puede demostrarse que la probabilidad de error del receptor basado en filtro adaptado no depende de la forma de pulso si no únicamente del cociente entre la energía promedio por bit  $E_b$  y la densidad espectral de ruido  $N_0$ . Para el caso antípoda, la probabilidad de error de bit es:

$$P_e = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \quad (1)$$

donde  $Q(\ )$  representa la función de “cola” de la distribución gaussiana normalizada. Cuando la señal binaria usa pulsos nulos para representar uno de los bits (caso ortogonal), la probabilidad

de error es:

$$P_e = Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right) \quad (2)$$

La probabilidad de error expresada en (1) y (2) se define como:

$$P_e = \lim_{N_b \rightarrow \infty} \frac{N_e}{N_b} \quad (3)$$

donde  $N_e$  representa el número de bits errados por cada  $N_b$  bits transmitidos. En la práctica, a la hora de estimar la probabilidad de error las simulaciones no pueden ser infinitas, por lo cual se suele aplicar la regla de tomar  $N_b$  igual a unas 100 veces el inverso de la probabilidad de error que se espera estimar. Esto significa que en la simulación estadística ocurrirán aproximadamente unos 100 errores.

Finalmente se puede comprobar que la densidad espectral de ruido gaussiano y blanco  $N_0$  y su desviación estándar se relacionan mediante:

$$\sigma = \sqrt{\frac{N_0}{2}} \quad (4)$$

## PREPARACIÓN

Al inicio de la sesión de laboratorio el estudiante debe entregar por escrito la preparación con el desarrollo de todas las actividades que se indican a continuación. Cuide la presentación del documento escrito, si está escrito a mano, debe ser legible. A aquel estudiante que no prepare todas las actividades no se le permitirá desarrollar el trabajo práctico.

1. A partir de la expresión general para la probabilidad de error del filtro adaptado, compruebe las fórmulas (1) y (2) de la revisión teórica.
2. Calcule y grafique la probabilidad de error  $P_e$  (como función de  $E_b/N_0$ ) para una señal binaria antípoda. Llene una tabla con los valores calculados de  $P_e$  tomando valores de  $E_b/N_0$  entre 3 dB y 6.5 dB, en intervalos de 0.5 dB. Para cada uno de estos valores de  $E_b/N_0$ , calcule el número de bits que habría que simular en cada caso a fin de estimar la probabilidad de error usando el criterio dado en la sección anterior. Todos estos datos deben ser reportados en la tabla.

*Las gráficas de Probabilidad de error deben hacerse con el eje vertical en escala logarítmica y el eje horizontal en escala lineal en dB.*

3. Repita la actividad 2 para el caso de una señal binaria en la cual se emplean pulsos nulos (0 Volt) para representar a los dígitos “0” (caso de señalización ortogonal).
4. Demuestre que la desviación estándar de una campana gaussiana es el punto en el cual la función cae a 60% de su valor máximo o central.

*Todas las tablas y gráficos, deben entregarse impresos al inicio de la sesión de laboratorio.*

5. Lea cuidadosamente la descripción de la simulación en la sección que sigue de este documento.

## LABORATORIO

### DESCRIPCIÓN DE LA SIMULACIÓN

El programa a emplear en esta práctica representa un sistema de comunicaciones digitales en banda base. Las amplitudes de los pulsos enviados se ajustan en el vector CONST (Constelación). Al ser un sistema binario, cada pulso representa un bit y un símbolo. La longitud de la simulación viene dada por el parámetro NSIMB, que indica el número de símbolos a simular. Cada símbolo es representado internamente a través de NMPS muestras. La Figura 1 representa el diagrama en bloques del sistema.

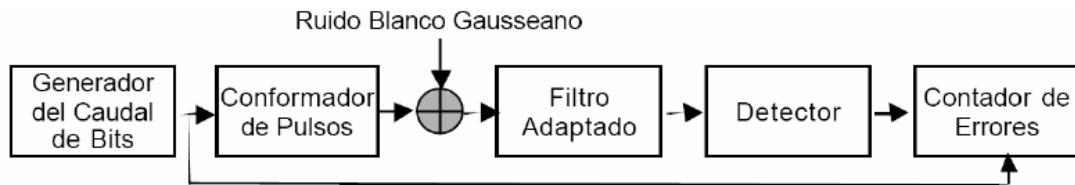


Figura 1. Diagrama de bloques del sistema simulado

El generador de caudal de bits produce 1's y 0's equiprobables. Como se ve en la figura, el canal de transmisión tiene una respuesta ideal en frecuencia (plana). La amplitud del ruido se ajusta a fin de obtener el valor de  $E_b/N_0$  deseado. El detector es simplemente un muestreador que opera al final de cada intervalo de bit. El contador de errores genera el estimado de la probabilidad de error. Tanto el conformador de pulsos como el filtro adaptado se implementan siguiendo la forma de raíz cuadrada de coseno alzado.

Los niveles producidos por el filtro adaptado vienen de una normalización de la tasa de bit promedio, es decir, se considera  $E_b = 1$ . Recuerde que la  $E_b$  puede calcularse a partir de un promedio de los cuadrados de los diferentes niveles posibles ponderados en función de su probabilidad de ocurrencia.

### EXPERIENCIAS PRÁCTICAS

1. Personalice la simulación introduciendo los números de carnet de los integrantes del grupo en las líneas 15 y 16. Esto tiene como fin garantizar realizaciones distintas de cada simulación para cada grupo.
2. Para el caso antípoda, especifique en la línea 12 el vector  $CONST = [1 \ -1]$ , en la línea 20 el parámetro  $NMPS = 2$  y en la línea 21 debe ajustar el parámetro  $NSIMB$  a los valores encontrados en el pre-laboratorio. Obtenga estimaciones para la probabilidad de error para

los valores de  $E_b/N_o$  entre 3 dB y 6,5 dB en intervalos de 0,5 dB. Este último punto se logra cambiando el parámetro  $EbNo\_dB$  en la línea 41. Compare con los valores predichos por la teoría. Guarde los valores obtenidos para graficarlos posteriormente.

3. Repita el punto 2 para el caso ortogonal, utilice  $CONST = [1 \ 0]$  (línea 12).
4. Con  $NMPS = 20$  y  $NSIMB = 503$  y sin ruido ( $EbNo\_dB = 100dB$ ), examine las primeras 200 muestras de la forma de onda recibida (vector  $Rsen$ ) para el caso antípoda y para el caso ortogonal. Note diferencias y similitudes. Note el valor de la señal en los puntos de muestreo (múltiplos de  $NMPS$ ). Utilice la instrucción `grid` de MATLAB para mejorar la precisión en la observación, en especial, para valores del eje horizontal de relevancia (puntos de muestreo).
5. Vuelva a ajustar  $NMPS = 2$  y  $NSIMB = 5000$  y  $EbNo\_dB = 4$ . Obtenga el histograma de la señal recibida  $Dsen$  con 50 niveles. Explique con detalle cada uno de los valores de interés. Estime la desviación estándar del ruido. Repita para  $EbNo\_dB = 8$ .
6. Represente en una sola gráfica las curvas teóricas y prácticas de probabilidad de error para los casos antípodas y binarios ¿Considera buena la aproximación práctica obtenida?
7. Compare el desempeño del sistema antípoda con el ortogonal en términos de probabilidad de error. Considere las ventajas y desventajas de cada uno y discuta sobre las posibles causas de las diferencias observadas.
8. Verifique que los valores de desviación estándar obtenidos en el experimento 5 coinciden con los valores teóricos en ambos casos. Recuerde que el programa normaliza automáticamente para hacer  $E_b = 1$ .