

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID  
REDES DE COMUNICACIONES I  
EJERCICIOS RESUELTOS**

**Autores:**  
**José Alberto Hernández Gutiérrez**  
**Javier Aracil Rico**  
**Víctor López Álvarez**

**TEMA 1: INTRODUCCIÓN A LAS REDES DE COMUNICACIONES**

**1.1.- (Forouzan, C1Ej9) Para una red con  $n$  dispositivos, ¿cuál es el número de enlaces de cable necesarios para una malla, un anillo, un bus y una topología en estrella?**

*Solución:*

*La topología en malla requiere:  $n(n-1)/2$  enlaces*

*El anillo:  $n$  enlaces*

*El bus: 1 enlace*

*Estrella  $n-1$  enlaces*

**1.2.- (Forouzan, C1Ej17) Para cada una de las cuatro redes siguientes, diga qué ocurriría si falla una conexión:**

**a.- Cinco dispositivos en topología de malla.**

*Solución: Un fallo impediría que dos nodos pudieran conectarse directamente, pero seguirían conectados a través de cualquier otro nodo a dos saltos.*

**b.- Cinco dispositivos en topología de estrella (sin contar el bus).**

*Solución: Un fallo en un enlace inhabilitaría la conexión entre un nodo y el nodo central.*

**c.- Cinco dispositivos en topología de bus.**

*Solución: Un fallo partiría la red en dos, haciendo imposible que las dos subredes se comunicaran entre sí. Sin embargo, dos equipos cualesquiera del mismo sub-bus sí podrían comunicarse.*

**d.- Cinco dispositivos en topología de anillo.**

*Solución: Un fallo haría que uno de los sentidos de comunicación estuviera inutilizado. Los dos nodos adyacentes al enlace caído se comunicarían dando la vuelta al anillo.*

**1.3.- (Forouzan, C1Ej23) El rendimiento es inversamente proporcional al retardo. Cuando se usa Internet, ¿cuáles de las aplicaciones siguientes son más sensibles al retardo?**

**a.- Enviar un email.**

**b.- Copiar un archivo.**

**c.- Navegar por Internet.**

*Solución: Por orden de mayor sensibilidad a menor:*

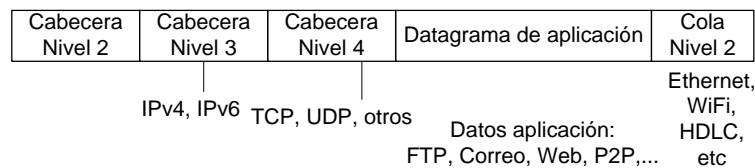
*Navegar por Internet > Enviar un email > Copiar un archivo.*

## TEMA 2: MODELOS DE REDES OSI Y TCP/IP

### 2.1.- (Forouzan, C2Ej7) ¿Qué son las cabeceras y las colas, y cómo se añaden y se eliminan?

*Solución: Las cabeceras y las colas las añade cada nivel del modelo OSI o TCP/IP. Los campos de cada cabecera y/o cola resumen la funcionalidad de cada nivel. Así por ejemplo, el nivel de enlace (nivel 2) añade direcciones origen y destino de ámbito local, aspectos de control de flujo, etc. El nivel IP (nivel 3) en la pila TCP/IP incluye por ejemplo aspectos como direccionamiento universal (direcciones IP), números de secuencia de los paquetes, checksum, TTL, etc.*

*Así, los datos de aplicación se encapsulan en un paquete con tantas cabeceras como niveles tiene la pila de protocolos, y cada una de ellas define un conjunto de campos que resuelven cierta funcionalidad asociada a ese nivel. Se muestra un ejemplo de encapsulación TCP/IP:*



### 2.2.- (Forouzan, C2Ej17) Relacione los siguientes conceptos con uno o más niveles del modelo OSI:

- a.- Entrega fiable de mensajes proceso a proceso. *Nivel de transporte*
- b.- Selección de la ruta. *Nivel de red*
- c.- Define tramas. *Nivel de enlace*
- d.- Ofrece al usuario servicios como el correo electrónico y la transferencia de archivos. *Nivel de aplicación*
- e.- Transmisión de un flujo de bits a través del medio físico. *Nivel físico*

### 2.3.- (Forouzan, C2Ej20) En la figura 2.22, el equipo A envía un mensaje al equipo B a través de la LAN1, router R1 y LAN2. Indique el contenido de los paquetes y tramas en el nivel de red y de enlace de datos para la interfaz de cada salto.

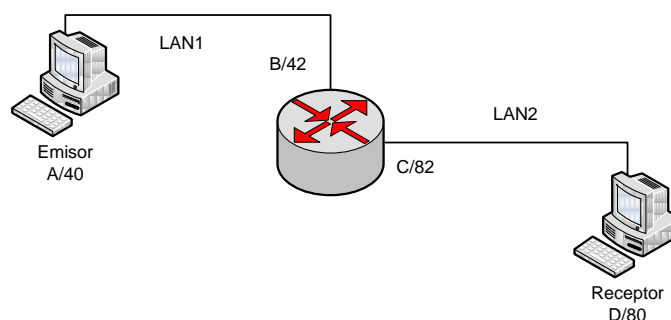


Fig. 2.22

*Solución: El paquete que envía el emisor al receptor debe tener como dirección física destino la del router (42), y como dirección lógica destino, la del receptor (D), esto es:*

*Paquete LAN1*

## REDES DE COMUNICACIONES I – EJERCICIOS RESUELTOS

Javier Aracil, José Alberto Hernández y Víctor López Álvarez

Nivel 2: Dest   Src	Nivel 3: Src   Dest	Nivel 4: Src   Dest		
42   40	A   D	I   J	Datagrama de aplicación	Cola Nivel 2
Ethernet	IP	TCP	Ethernet	

*El router, cuando recibe el paquete por su interfaz con LAN1, extrae la dirección de destino del paquete, esto es D, busca en su tabla interna de encaminamiento y encuentra que el paquete debe dirigirse al equipo D por la LAN2. Mantiene la estructura del paquete de nivel 3 para arriba pero cambia la cabecera y/o cola del nivel de enlace (nivel 2) puesto que la LAN2 puede ser diferente a la LAN1. En cualquier caso, las direcciones físicas deben ser actualizadas:*

### *Paquete LAN2*

Nivel 2: Dest   Src	Nivel 3: Src   Dest	Nivel 4: Src   Dest		
80   82	A   D	I   J	Datagrama de aplicación	Cola Nivel 2
Ethernet	IP	TCP	Ethernet	

*Es importante no olvidar que los routers solo implementan hasta el nivel 3 de la pila de protocols, con lo cual no tienen capacidad para interpretar la cabecera de nivel 4 ni tampoco el contenido de los datos.*

**2.4.- (Forouzan, C2Ej21) En la figura 2.22, asuma que la comunicación se realiza entre un proceso que ejecuta un equipo A con puerto i y un proceso que ejecuta un equipo D con puerto j. Indique el contenido de los paquetes y tramas en el nivel de red, de enlace de datos y de transporte de cada salto.**

*Solución: Véase los datagramas de arriba.*

**TEMA 3: PRESTACIONES DE REDES DE COMUNICACIONES**

**3.1.- (Forouzan, C2Ej38) Un archivo contiene 2 millones de bytes. ¿Cuánto tiempo cuesta descargar este archivo por un canal de 56Kbps (MODEM 56K)? ¿Y por uno de 1Mbps (ADSL 1M)?**

*Solución:*

*Se asume que el archivo se encuentra a un salto del equipo que lo quiere descargar y se considera sólo el retardo de transmisión como fuente de retardo. Entonces:*

$$\text{Caso 1 (Velocidad típica de un MODEM 56K): } r_{tx} = \frac{8 \times 2 \cdot 10^6 \text{ bytes}}{56 \cdot 10^3 \text{ bytes / seg}} = 285.71 \text{ seg} :$$

$$\text{Caso 2 (Velocidad típica de ADSL 1M): } r_{tx} = \frac{8 \times 2 \cdot 10^6 \text{ bits}}{1 \cdot 10^6 \text{ bit / seg}} = 16 \text{ seg}$$

**3.2.- (Forouzan, C2Ej39) El monitor de una computadora tiene una resolución de 1200 por 1000 píxels. Si cada píxel usa 1024 colores, ¿cuántos bits son necesarios para enviar todo el contenido de una pantalla?**

*Solución:*

*1024 colores se representan con 10 bits ya que  $\log_2 1024 = 10$ . De esta forma, cada pantallazo supone una cantidad de información de:  $10 \times 1000 \times 1200 = 12 \text{ Mbits}$*

**3.3.- En el ejercicio anterior, ¿cuánto tiempo tardaría cada pantallazo en ser transmitido por un canal de 1Mbps?**

*Solución:*

*El retardo de transmisión de un pantallazo por un canal de 1Mbps requeriría:*

$$r_{tx} = \frac{12 \cdot 10^6 \text{ bits}}{1 \cdot 10^6 \text{ bit / seg}} = 12 \text{ seg}$$

*Algunos modelos de compresión de vídeo consiguen reducciones de 100 a 1. En este caso, el retardo de transmitir la misma información, pero comprimida sería 100 veces menos: 0.12 seg aproximadamente.*

**3.4.- (Forouzan, C2Ej48) ¿Cuál es el retardo total (latencia) de una trama de 5 millones de bits que se envía por un enlace con 10 routers, cada uno de los cuales tiene un tiempo de encolamiento de  $2 \mu s$  y un tiempo de procesamiento de  $1 \mu s$ ? La longitud del enlace es de 2000km, y la velocidad de la luz dentro del enlace es  $2 \times 10^8 \text{ m/s}$ . El enlace tiene un ancho de banda de 5 Mbps ¿Qué componente del retardo total es dominante? ¿Cuál es despreciable?**

*Solución:*

*Como el enlace total es de 2000km, cada enlace consta de aproximadamente 200km. Vamos a calcular cada uno de los retardos por separado para un enlace de 200km:*

$$r_{prop} = \frac{200 \cdot 10^3 \text{ m}}{2 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 1 \text{ ms}, \quad r_{tx} = \frac{5 \cdot 10^6 \text{ bits}}{5 \cdot 10^6 \text{ bit / seg}} = 1 \text{ s} \quad r_{cola} = 2 \mu s \quad r_{proc} = 1 \mu s$$

*Retardo total por enlace:  $r_{tot} = r_{prop} + r_{tx} + r_{cola} + r_{proc} = 1.001003 \text{ seg}$ . Para los 10 enlaces, el retardo total sería de 10 veces esta cantidad.*

*En este caso, el retardo de transmisión es dominante sobre los demás.*

**3.5.- (Forouzan, C2Ej48) Tenemos un enlace de 2km de longitud con capacidad 100Kbps, por el que queremos transmitir un paquete de 1250 bytes. Suponiendo que la velocidad de propagación en este enlace es de  $2 \times 10^8 \text{ m/s}$  ¿Qué retardo**

**es mayor: el de transmisión o el de propagación? ¿Qué ocurriría si la capacidad del enlace aumenta a 100Mbps? ¿Y si aumenta a 10Gbps?**

*Solución:*

*En todos los casos, el retardo de propagación es el mismo:  $r_{prop} = \frac{2 \cdot 10^3 m}{2 \cdot 10^8 m/s} = 10 \mu s$*

*Ahora vamos a calcular cuál es el retardo de transmisión para cada uno de los casos:*

*Enlace 100Kbps:  $r_{tx} = \frac{8 \times 1250 bits}{100 \cdot 10^3 bit / seg} = 0.1 s$ . En este caso  $r_{tx} \gg r_{prop}$*

*Enlace 100Mbps:  $r_{tx} = \frac{8 \times 1250 bits}{100 \cdot 10^6 bit / seg} = 0.1 ms$ . En este caso  $r_{tx} > r_{prop}$*

*Enlace 10Gbps:  $r_{tx} = \frac{8 \times 1250 bits}{10 \cdot 10^9 bit / seg} = 1 \mu s$ . En este caso  $r_{tx} < r_{prop}$*

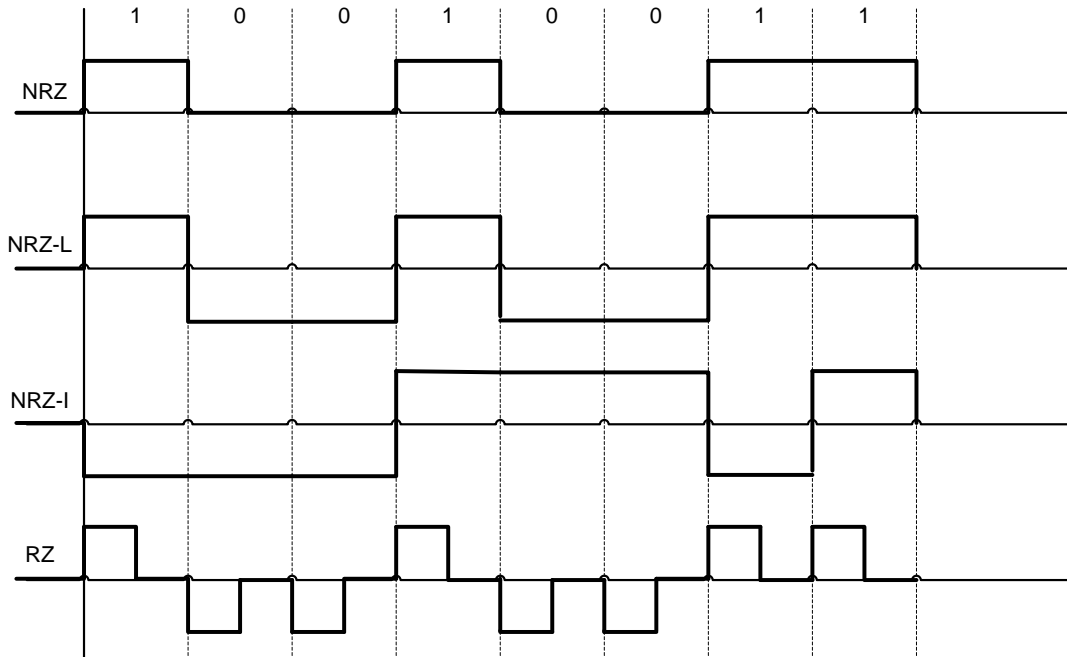
*Como puede verse, para un enlace dado una componente de retardo es mayor que otra dependiendo de la capacidad del enlace (y del tamaño del paquete a transmitir).*

**TEMA 4: MODULACIONES DIGITALES I: TRANSMISIÓN EN BANDA BASE Y PCM**

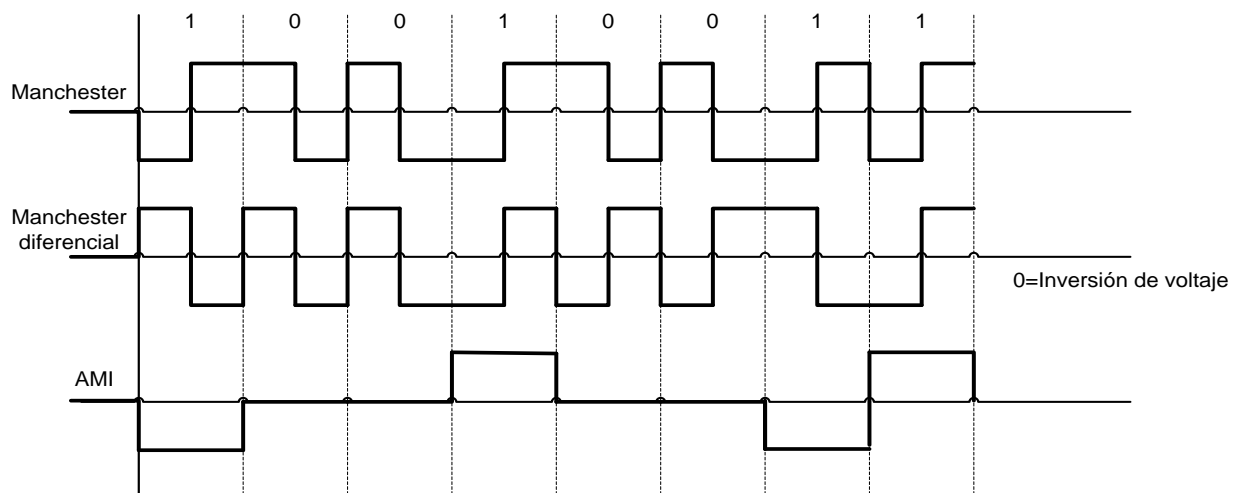
**4.1.- Dibuje un gráfico con la señal transmitida para la secuencia 10010011 siguiendo los esquemas de modulación: NRZ, NRZ-L, NRZ-I, RZ, Manchester, Manchester diferencial y AMI. Utilice 1ms como tiempo de bit.**

*Solución:*

*El siguiente gráfico muestra la señal transmitida para los casos NRZ, NRZ-L, NRZ-I y RZ:*



*El siguiente gráfico muestra la señal transmitida para los casos Manchester, Manchester diferencial y AMI:*



**4.2.- (Forouzan C4ej25) ¿Cuántos código inválidos (no usados) se pueden tener en la codificación 5B/6B? ¿Y para la codificación 3B/4B?**

*Solución:*

*5B/6B: Se utilizan  $2^5=32$  posibilidades de un total de  $2^6=64$  posibles combinaciones de bits de entrada ( $64-32=32$  patrones de error). En el caso 3B/4B, el conjunto de patrones de error es  $2^4-2^3=8$  patrones de error.*

**4.3.- ¿Cuál es la tasa de muestreo requerida para cada una de las señales siguiente:**

**a. Una señal de voz con ancho de banda  $B=3.4\text{KHz}$**

*Solución:*  $f_s > 6800\text{Hz} = 6800 \text{ muestras/seg}$

**b. Una señal de música con ancho de banda  $B=18\text{KHz}$**

*Solución:*  $f_s > 36\text{KHz} = 36000 \text{ muestras/seg}$

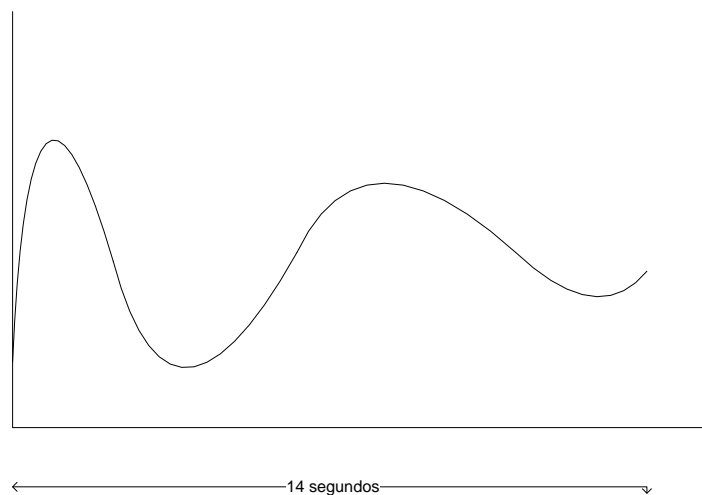
**4.4.- En telefonía digital, las señales de voz se codifican con un PCM con una tasa de muestreo de 8000muestras/seg y 256 niveles de voltaje. Determine la tasa en bits/seg transmitida a la central telefónica**

*Solución:*

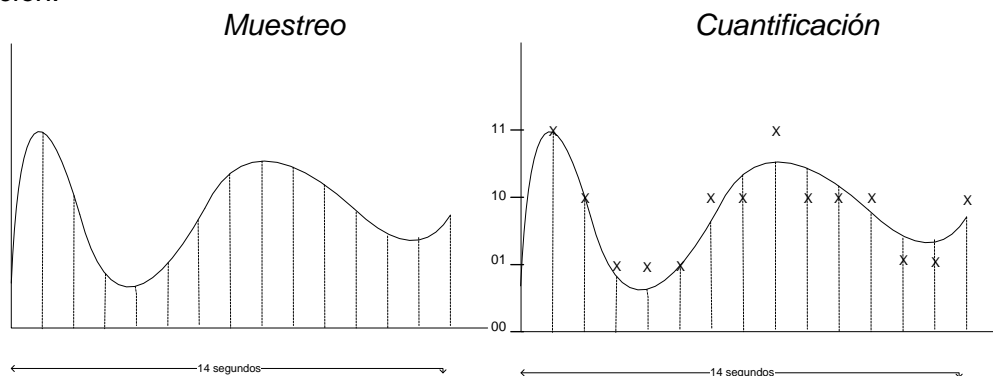
*Efectivamente, la tasa de muestreo utilizada es suficiente para la codificación de voz pues supera el doble de la frecuencia máxima de las señales de voz, típicamente de 3.4KHz. La tasa transmitida en bits por segundo es:*

*$R_b = (8000 \text{ muestras/seg}) (\log_2 256 \text{ bits/muestra}) = 64000 \text{ bits/seg}$*

**4.5.- Sea la señal de voz de la figura. Se quiere muestrear esta señal a una tasa de 1 muestra/seg pues se ha comprobado que es tasa cumple con el teorema de muestreo. Además, se quiere cuantificar esta señal con dos bits (cuatro niveles). Dibuje la señal muestreada y cuantificada.**



*Solución.*





**TEMA 5: MODULACIONES DIGITALES II: TRANSMISIÓN PASO BANDA**

**5.1.- Indique qué tipo de modulación se tiene para las siguientes constelaciones, y calcule el valor de la amplitud de los senos y cosenos:**

**a.- Dos puntos en (2,0) y (3,0).** *Solución: BASK con amplitudes +2V y +3V*

**b.- Dos puntos en (3,0) y (-3,0).** *Solución: BPSK con amplitud +3V. También podría ser una BASK con amplitudes de +3V y -3V.*

**c.- Cuatro puntos en (-2,-2), (-2,2), (2,-2) y (2,2).** *Solución: QAM, con amplitud*

$$\sqrt{2^2 + 2^2} = 2\sqrt{2}$$

**d.- Dos puntos en (0,-2) y (0,2).** *Solución: BASK con amplitudes +2V y -2V, o BPSK con amplitud +2V.*

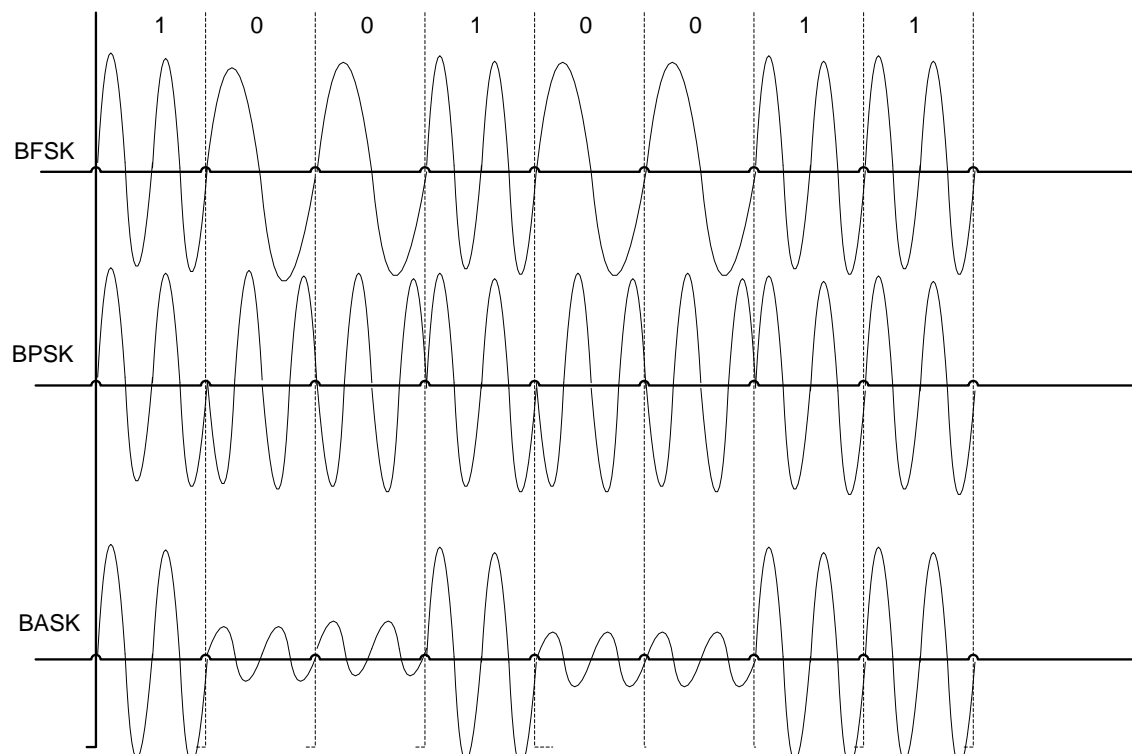
**5.2.- Dibuje la señal transmitida para la información 10010011 para cada una de las siguientes modulaciones (suponga un tiempo de bit  $T_b=1\text{ms}$ ):**

**a.- BFSK** donde un 1 lógico se construye con un seno a frecuencia  $2/T_b$ , y un 0 lógico se construye con una señal de frecuencia  $1/T_b$ . Amplitud y fase constantes a +5V y  $0^\circ$ .

**b.- BPSK** donde el 1 lógico se construye con un seno de fase  $0^\circ$  y un 0 lógico se construye con un seno de fase  $180^\circ$ . Frecuencia  $f_c = 2/T_b$  constante y amplitud +5V constante.

**c.- BASK** donde el 1 lógico se construye con un seno de amplitud +5V y un 0 lógico se construye con un seno de amplitud +2V. Frecuencia  $f_c = 2/T_b$  y fase  $0^\circ$  constantes.

*Solución:*



**5.3.- Se barajan dos alternativas para transmitir información por un enlace inalámbrico. La primera alternativa considera una modulación BPSK con tiempo de símbolo de  $T_b=1\text{ms}$ . La segunda alternativa sería utilizar una QAM con tiempo de símbolo de 5ms. La amplitud de las señales a transmitir no debe superar los +5V. Razone qué modulación consigue mayor capacidad del canal y qué ventajas supone sobre la otra.**

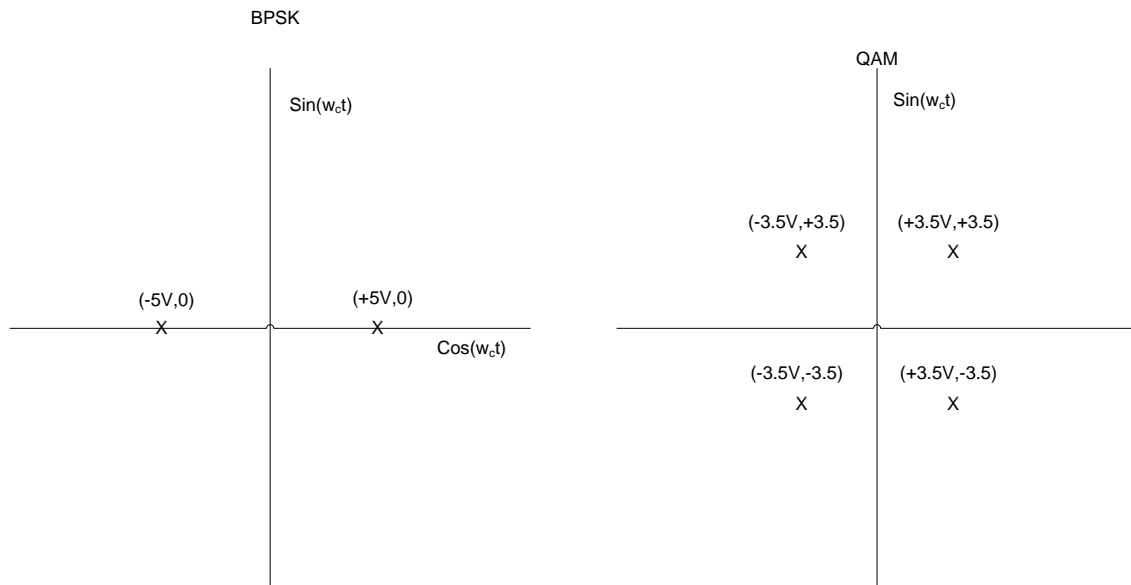
*Solución:*

La primera solución (BPSK) consigue una tasa:  $R_b = \frac{1bit}{1ms} = 1000bits / seg$

La segunda solución (QAM) consigue una tasa de transmisión:

$$R_b = \frac{2bits}{5ms} = 400bits / seg$$

Las constelaciones serían:



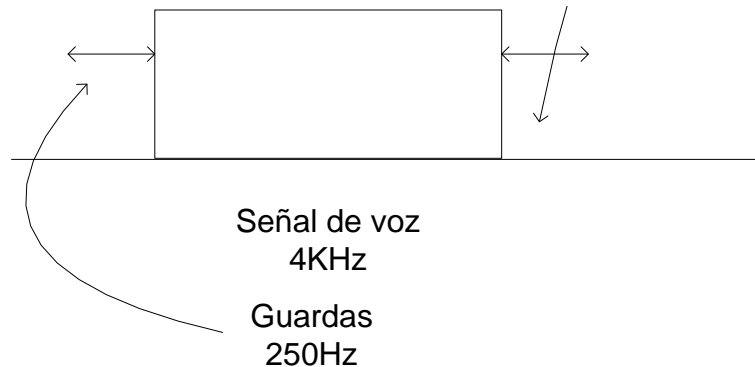
Nótese que para la QAM, los puntos deben estar en  $(\pm 5\sqrt{2}, \pm 5\sqrt{2})$  para, de esta forma, tener amplitud de +5V. Esto deja una distancia entre símbolos de aproximadamente 7V, mientras que en el primer caso esta distancia es de 10V. Por tanto, en este ejemplo, la modulación BPSK propuesta ofrece mejores prestaciones en cuanto a tasa de bits y probabilidad de error (mayor distancia entre símbolos).

**TEMA 6: MULTIPLEXACIÓN Y ESPECTRO ENSANCHADO**

**6.1.- Asuma que un canal de voz ocupa un ancho de banda de 4KHz. Se necesita multiplexar 10 canales con bandas de guarda de 500Hz utilizando FDM. Calcule el ancho de banda necesario.**

*Solución:*

*Las bandas de guarda representan la porción de espectro sin usar que se utiliza para separar los canales multiplexados con FDM. Bandas de guarda de 500Hz supone que un canal de 4KHz deja libre 250Hz a su izquierda y otros 250Hz a su derecha. Así, cada canal necesita:*



*Así, en total es necesario:  $10 \times (4\text{KHz} + 2 \times 0.25\text{KHz}) = 45\text{KHz}$*

**6.2.- Se necesita utilizar TDM síncrono para combinar 20 fuentes digitales, cada una de 100Kbps. Cada trama transporta 1 bit de cada fuente más un bit de sincronización. Responda a las siguientes preguntas:**

- ¿Cuál es el tamaño de la trama de salida en bits? 21 bits totales**
- ¿Cuál es la tasa de tramas de salida? 100000 tramas/seg**
- ¿Cuál es la duración de la trama de salida?**

*Antes de multiplexar:  $T_{bit} = \frac{1}{100000\text{bits} / \text{seg}} = 10\mu\text{s}$ .*

**d. ¿Cuál es la tasa de datos de salida?**

*Después de multiplexar, en los mismos  $10\mu\text{s}$  se deben transportar los 21 bits:*

$$R_b = \frac{21\text{bits}}{10\mu\text{s}} = 2.1\text{Mbps}$$

**e. ¿Cuál es la eficiencia del sistema (tasa de bits útiles respecto a bits totales)?**

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{datos}}{\text{totales}} = \frac{20\text{bits}}{21\text{bits}} = 0.95$$

**6.3.- Tenemos una línea E-1 a compartir por 20 fuentes digitales. De esas, 7 fuentes transmiten a 100Kbps y 13 fuentes transmiten a 50 Kbps. Diseñe cuántos slots deben asignarse a cada fuente y determine si sería necesario con una única línea E-1 o harían falta más líneas.**

*Solución:*

*Una línea E-1 es capaz de transportar 30 fuentes DS0 de 64Kbps cada una. Las 7 fuentes que ofrecen 100 Kbps requerirían 2 time-slots cada una, mientras que los datos ofrecidos por las otras 13 fuentes caben en un time-slot. Recordar que cada time-slot da servicio para 64Kbps. Así, serían necesarios  $7 \times 2 + 13 \times 1 = 27$  time-slots del total de 30, con lo cual la línea E-1 sí sería suficiente (quedarían libres 3 time-slots).*

**TEMA 7: MEDIOS DE TRANSMISIÓN**

**7.1.- Se ha medido un cable coaxial de fabricación propia y se ha encontrado que la expresión de atenuación en función de la distancia y frecuencia sigue la ley:**

$$Att = 2f^2 \frac{dB}{km \cdot KHz} \text{ siendo } Att \text{ la atenuación medida en } dB/km, \text{ y } f \text{ la frecuencia}$$

**medida en KHz. Suponiendo que un generador de tráfico inyecta señales BPSK con potencia media 10mW, determine:**

**(a) La potencia recibida al otro lado de un cable de 100m si la señal sinusoidal tiene una frecuencia de 10 KHz.**

*Solución:*

*Según la ecuación de la atenuación, a la frecuencia  $f=10KHz$ , la atenuación sufrida por*

$$\text{la señal es de } Att = 2 \times 10^2 = 200 \frac{dB}{km}.$$

*Por tanto, después de 100 m, la señal transmitida habrá sufrido unas pérdidas de*

$$Att = 200 \frac{dB}{km} \times 0.1km = 20dB.$$

*La señal recibida será:  $P_R (dBm) = P_T (dBm) - Att (dB) = 10\log_{10} 10 - 20 = -10dBm$ .*

**(b) La frecuencia mínima de la señal sinusoidal para obtener distancias superiores a 100m y 2.5km. Suponga un receptor con sensibilidad -60dBm.**

*Solución:*

*Para que el receptor sea capaz de distinguir la señal correctamente, el nivel máximo de atenuación debe ser:  $Att = P_T (dBm) - P_R (dBm) \leq 10dBm - (-60dBm) = 70dB$ .*

*Por lo tanto, la frecuencia de transmisión de la señal BASK debe*

*cumplir:  $2f^2 \leq 70dBm$ .*

$$\text{Para un cable de longitud 100m: } f \leq \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{70dB}{0.1km}} = 18.71KHz$$

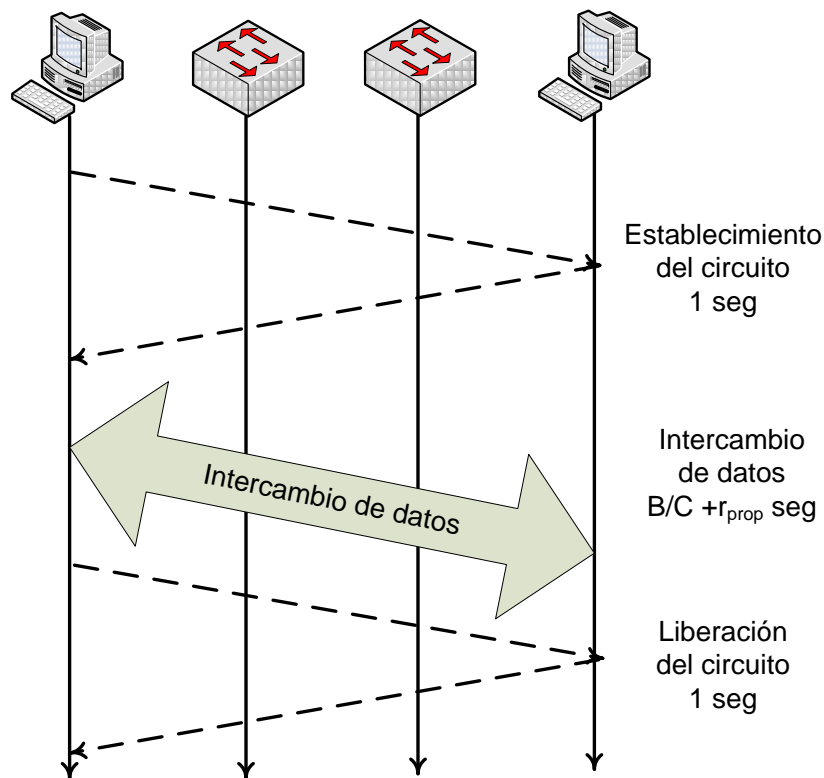
$$\text{Para un cable de longitud 2.5km: } f \leq \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{70dB}{2.5km}} = 3.74KHz$$

**TEMA 8: CONMUTACIÓN**

**8.1.-** Se quiere transmitir un fichero de 10MBytes por una red que admite conmutación de paquetes o circuitos. El fichero debe atravesar dos conmutadores (de circuitos o de paquetes). Se quiere evaluar qué alternativa resulta más rentable desde un punto de vista de retardo: Conmutación de circuitos o paquetes.

**a) Conmutación de circuitos:** Los tiempos de establecimiento y liberación del circuito son de 1 segundo. La capacidad de los enlaces es de 100 Mbps y el tiempo de procesamiento es despreciable. Cada uno de los enlaces mide 1 km, y la velocidad de propagación de la luz en los enlaces es de 250000 km/seg.

*Solución:*



El tiempo de intercambio de datos es:  $\frac{8 \times 10^7 \text{ bits}}{100 \times 10^6 \text{ bits / seg}} + \frac{3 \text{ km}}{250000 \text{ km / seg}} \cong 80 \text{ ms}$  Por

lo tanto, el tiempo total requerido para transmitir el fichero es de 2.08 segundos

**b) Conmutación de paquetes:** El fichero se divide en paquetes de 1500bytes. La capacidad de los enlaces es de 100 Mbps y el tiempo de procesamiento (lectura de cabeceras y búsqueda en la tabla de encaminamiento) es de 1 ms. Cada uno de los cuatro enlaces mide 1 km, y la velocidad de propagación de la luz en los enlaces es de 250000 km/seg. Se utiliza un protocolo de parada y espera con tamaño de ACK despreciable.

*Solución:*

En este caso, es necesario transmitir  $\frac{10^7 \text{ bytes}}{1500 \text{ bytes / paq}} = 6667 \text{ paqs}$  6667 paquetes de

1500 bytes cada uno. Debido al protocolo de parada y espera, hasta que no llega cada paquete de datos al otro extremo no se puede enviar un nuevo paquete de datos. Así, cada paquete sufre un retardo total de:

$$r_{paq} = \frac{8 \times 1500 \text{ bytes}}{100 \times 10^6 \text{ bits / seg}} + \frac{6 \text{ km}}{250000 \text{ km / seg}} + 2 \times 1 \text{ ms} = 2.144 \text{ ms / paq}$$

Así, el total de los paquetes tardaría en transmitirse:  $6667 \times r_{paq} = 14.29 \text{ seg}$

**c) Enumere las ventajas de uno y otro paradigma de conmutación, y comente los resultados obtenidos en los apartados anteriores.**

*Solución:*

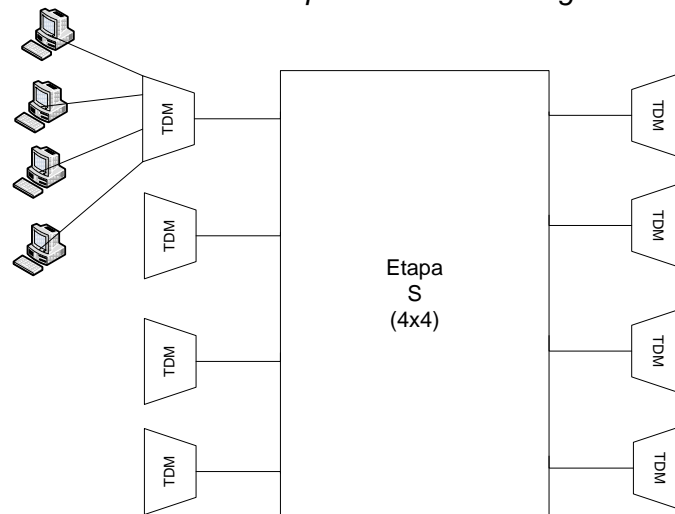
*La conmutación de circuitos requiere establecimiento y liberación del circuito. Además, debido a la reserva del circuito, otros equipos no pueden utilizar los recursos reservados por el circuito. Todo esto hace que la conmutación de circuitos sea menos eficiente por regla general que la de paquete, sin embargo proporciona mejor calidad de servicio que la conmutación de paquetes debido a esa reserva a priori de recursos. La conmutación de paquetes generalmente representa las características opuestas a la conmutación de circuitos.*

*En este ejemplo concreto, la conmutación de circuitos proporciona mejores resultados que la conmutación de paquetes, principalmente porque éste último utiliza el mecanismo de parada y espera que lo hace muy ineficiente unido al alto retardo de procesamiento de paquetes en los conmutadores intermedios.*

**8.2.- Se tiene un conmutador TST con 16 entradas y 16 salidas. La etapa S es un crossbar 4x4. Dibuje la arquitectura de este conmutador y determine la cantidad de memoria necesaria para las etapas T. ¿Cómo sería este conmutador utilizando una etapa S crossbar 8x8?**

*Solución:*

*Un diagrama abreviado del conmutador pedido es el de la figura de abajo:*



*Como puede verse, se requiere 8 multiplexores TDM de 4 entradas y 4 time-slots de salida. De esta forma, cada multiplexor TDM debe almacenar 4 mapeos de entrada/salida, o lo que es lo mismo, 4 mapeos de 2 bits entrada / 2 bits salida = 16 bits totales.  $16 \text{ bits/etapa T} \times 8 \text{ etapas T} = 128 \text{ bits totales}$ .*

*Una etapa S crossbar de 8x8 requeriría 4 multiplexores TDM con 8 entradas / 8 time-slots de salida, o lo que es lo mismo, 3 bits interfaz entrada / 3 bits time-slot salida. En total, la memoria necesaria sería  $9 \text{ bits/etapa T} \times 4 \text{ etapas} = 36 \text{ bits totales}$ .*

**TEMA 10: DETECCIÓN Y CORRECCIÓN DE ERRORES**

**10.1.- Considere un código C(6,2) tal que los cuatro bits de paridad siguen las siguientes reglas:**

$$r_0 = x_0$$

$$r_1 = x_1$$

$$r_2 = x_0 + x_1$$

$$r_3 = x_0 + x_1$$

**Determine:**

**a) Obtenga además la tabla de mapeo de palabras mensaje con palabras código. Si el código es lineal, es decir, si cualquier combinación de palabras código es también palabra código.**

*Solución:*

*La tabla que mapea palabras mensaje con palabras código es la siguiente:*

Mensaje (1xk)	Código (1xn)
00	000000
01	011101
10	101110
11	110011

*Este código es lineal porque la combinación de dos palabras código cualesquiera también es palabra código. Esto puede verse de la tabla anterior.*

**b) El número de palabras error posible, y el porcentaje de palabras error con respecto a palabras código totales.**

*Solución:*

*El número de palabras totales de este código es  $2^n = 64$  palabras posibles. De ellas, sólo  $2^k = 4$  palabras código son válidas, el resto corresponde a palabras error.*

*El porcentaje pedido sería:  $\frac{2^n - 2^k}{2^n} = \frac{60}{64} = 0.9375$ , esto es, un 93.75% de palabras posibles corresponde a errores.*

**c) La matriz G generadora del código y matriz H de control de paridad.**

*Solución:*

*La matriz generadora G se construye a partir de una matriz identidad  $I_{2 \times 2}$  y una matriz de paridad  $P_{2 \times 4}$  obtenida a partir de las reglas definidas para este código  $G = [I_{2 \times 2} \mid P_{2 \times 4}]$ :*

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

*Así, cualquier palabra código se construye a partir de una palabra mensaje mediante el producto de matrices:  $x = mG$ .*

*A partir de P se puede obtener la matriz H, como  $H = [P^T_{4 \times 2} \mid I_{4 \times 4}]$ :*

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

*Con H, se puede calcular el síndrome de una palabra recibida r como  $s = rH^T$*

**d) Obtenga la distancia mínima de este código y determine el número de bits que podría detectar y el número de bits que podría corregir este código.**

*Solución:*

A partir de la tabla, se puede ver a ojo que la distancia mínima de este código es  $d_{\min}=4$ , ya que entre dos palabras código cualesquiera existe al menos cuatro bits diferentes de los seis totales. También se puede obtener la distancia mínima del código calculando el mínimo número de columnas linealmente independientes de  $H$ , que son cuatro, ya que la primera columna  $c_1=c_3+c_4+c_5$  y la segunda columna es  $c_2=c_3+c_4+c_6$ . Por tanto, este código es capaz de detectar  $d_{\min}-1=3$  errores y corregir:

$$\left\lfloor \frac{d_{\min} - 1}{2} \right\rfloor \text{ errores}$$

**e) Defina qué es el síndrome de una palabra recibida y determine si la palabra recibida  $r=[0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1]$  es válida o no.**

*Solución:*

El síndrome de una palabra recibida  $r$  se calcula a partir de la matriz de control de paridad  $H$  como  $s=rH^T$  y nos dice si la palabra recibida ha sufrido errores (síndrome diferente de cero) o se ha recibido correctamente sin errores (si síndrome igual a cero).

Para la palabra recibida del enunciado, su síndrome es:

$$s = rH^T = [0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1] \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

Es síndrome es distinto de cero, con lo cual la palabra recibida es incorrecta. También de la tabla se observa que la palabra recibida no existía dentro del conjunto de palabras código válidas. Podríamos decir que aquella palabra código válida que más se parece (esto es, más cercana en cuanto a distancia de Hamming) a la palabra recibida es  $[0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1]$ . Con lo cual, el mensaje enviado más probable es  $[0 \ 1]$ .

**10.2.- Dado un código CRC con polinomio generador  $g(X)=X^3+X^2+1$ , determine la palabra código transmitida para el mensaje  $[1 \ 1 \ 1 \ 0]$ . Determine además si la palabra recibida  $[1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0]$  ha recibido errores de transmisión o no.**

*Solución:*

Para determinar los bits de redundancia de los datos  $[1 \ 1 \ 1 \ 0]$  hay que obtener el resto del siguiente cociente de polinomios:  $\frac{X^3(X^3 + X^2 + X)}{X^3 + X^2 + 1}$

Dividiendo los polinomios obtenemos que:

$$\frac{X^3(X^3 + X^2 + X)}{X^3 + X^2 + 1} = X^3 + X + \frac{X}{X^3 + X^2 + 1}, \text{ siendo el resto de la división } X.$$

Por tanto, la palabra código final es:  $X^6+X^5+X^4+X$  o, en binario:  $[1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]$

Para determinar si la palabra recibida  $[1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0]$  ha sufrido errores o no, hacemos la división de polinomios siguiente y vemos si su síndrome (el resto de la división) es cero o no:



$$\frac{X^6 + X^5 + X^4 + X^2 + X}{X^3 + X^2 + 1}$$

*Esta división tiene como cociente  $X^2$ . Por ello, la palabra no es correcta, sí ha sufrido errores de transmisión, y debería ser retransmitida si se está implementando un protocolo de nivel de enlace con control de errores.*

**TEMA 11: CONTROL DE ENLACE DE DATOS**

**11.1.- Se quiere utilizar un enlace de comunicaciones via satélite con órbita geoestacionaria (36000 km) para transmitir paquetes de 1500 bytes, con un protocolo de parada y espera. Calule:**

**a) La eficiencia del enlace de comunicaciones si la capacidad del enlace es de 100 Mbps. Considere  $v_p=300000$  km/s como valor de velocidad de la luz. Calcule además la tasa efectiva de transmisión de datos.**

*Solución:*

$$U = \frac{1}{1 + 2a}, \text{ siendo } a = \frac{t_{prop}}{t_{tx}}$$

$$\text{Calculamos } a = \frac{d/v_p}{8L/C} = \frac{0.12s}{1.2 \times 10^{-4}s} = 1000. \text{ Así, la eficiencia será:}$$

$$U = \frac{1}{1 + 2a} = \frac{1}{1 + 2 \times 1000} = 0.05\% \text{ muy baja, era de esperar de un enlace con tanto retardo de propagación.}$$

*Por tanto, la tasa efectiva es un 0.05% de 100Mbps:0.05Mbps*

**b) Determine la mejora de la eficiencia conseguida si se incrementa la capacidad en un orden de magnitud, es decir, hasta 1 Gbps.**

*Solución:*

$$\text{En este caso, el nuevo valor de } a \text{ será: } a = \frac{d/v_p}{8L/C} = \frac{0.12s}{1.2 \times 10^{-5}s} = 10000. \text{ Así, la}$$

$$\text{eficiencia será: } U = \frac{1}{1 + 2a} = \frac{1}{1 + 2 \times 10000} = 0.005\%$$

*Por tanto, la tasa efectiva es un 0.005% de 1000Mbps:0.05Mbps, igual que en el caso anterior.*

**c) Determine la mejora de la eficiencia conseguida si se utiliza un protocolo de ARQ con ventana deslizante de tamaño  $S_{tam}=5$ .**

*Solución:*

*Ahora, con ventana deslizante de tamaño  $S_{tam}=5$  se consigue una eficiencia de:*

$$U = \frac{S_{tam}}{1 + 2a} = 0.25\%, \text{ que es cinco veces superior al caso a)}$$

*Realmente, es el parámetro  $S_{tam}$  el que contribuye de forma fundamental a la mejora de la eficiencia en la comunicación.*

**d) Determine el tamaño de la ventana necesario para conseguir una eficiencia del 20%, esto es  $U=0.2$ .**

*Solución:*

$$\text{Despejando de las ecuaciones, } S_{tam} = U(1 + 2a) = 0.2 \times (1 + 2 \times 1000) \approx 400$$

**11.2.- Tenemos un enlace de comunicaciones en el que se ha medido una tasa de error de bit (o Bit Error Rate) de  $BER=10^{-5}$ . Se quiere ver qué sale más rentable si enviar paquetes de 1KBytes o paquetes de 100Bytes. Razone qué tamaño de paquete es mejor desde un punto de vista de eficiencia sabiendo que**

**se utiliza un protocolo de parada y espera, el retardo de propagación es de 1ms y la capacidad del enlace es de 10Mbps.**

**Solución:**

*Sabemos que la eficiencia para el protocolo de parada y espera en entornos con*

*errores es:  $U = \frac{1-p}{1+2a}$ . Así, en primer lugar, calculamos los retardos de transmisión*

*para los dos casos, que nos darán el valor del parámetro  $a$ :*

$$t_{tx} = \frac{8L}{C} = \frac{8 \times 100}{10 \times 10^6} = 8 \times 10^{-5} \text{ s}, \text{ lo cual nos da un valor de: } a = \frac{10^{-3} \text{ s}}{8 \times 10^{-5} \text{ s}} = 12.5$$

$$t_{tx} = \frac{8L}{C} = \frac{8 \times 1 \times 10^3}{10 \times 10^6} = 8 \times 10^{-4} \text{ s}, \text{ lo cual nos da un valor de: } a = \frac{10^{-3} \text{ s}}{8 \times 10^{-4} \text{ s}} = 1.25$$

*Lo siguiente es ver el valor de  $p$  para cada uno de los casos. El PER (Packet Error Rate) o probabilidad de pérdida de un paquete se obtiene a partir del BER como:*

$$p = PER = 1 - (1 - BER)^{8L_1} = 7.97 \times 10^{-3}$$

*(El PER se puede aproximar como  $p = PER \approx 8L \times BER = 8 \times 10^{-3}$  si  $L$  no es muy grande).*

$$p = PER = 1 - (1 - BER)^{8L_2} = 0.0769$$

*Con lo cual la eficiencia en ambos casos es:*

$$U = \frac{1-p}{1+2a} = \frac{1-8 \times 10^{-3}}{1+2 \times 12.5} = 0.038$$

$$U = \frac{1-p}{1+2a} = \frac{1-8 \times 10^{-2}}{1+2 \times 1.25} = 0.26$$

*El caso de los paquetes grandes es más óptimo. Sin embargo, se puede demostrar que si el tamaño de los paquetes sube a 100KBytes, entonces la eficiencia es mucho más baja. No siempre incrementar el tamaño de los paquetes mejora la eficiencia en entornos ruidosos como este. Se deja de ejercicio obtener la eficiencia del enlace si el tamaño de los paquetes sube a esta cantidad.*

**11.3.- Considere un enlace símplex con probabilidad de pérdida asimétrica, donde la probabilidad de pérdida de paquete es  $B_p$  y la probabilidad de pérdida de asentimiento es  $B_a$ . La capacidad del enlace es  $C$  bps, el tamaño del paquetes es  $M$  bits y el retardo extremo a extremo ida y vuelta es  $RTT$  segundos. Calcule el caudal medio efectivo en bps con ARQ de parada y espera en estos términos.**

**Solución:**

*Sabemos que la eficiencia para el protocolo de parada y espera en entornos con*

*errores es:  $U = \frac{1-p}{1+2a}$ .*

$$\text{Recordamos los valores de } a = \frac{RTT/2}{M/C} \text{ y } p = 1 - (1 - B_p)(1 - B_a)$$

*En la mayoría de los escenarios  $B_p \gg B_a$  y se suele aproximar:  $p \approx B_p$ .*

$$\text{Por tanto, la tasa efectiva es: } C \times U = C \frac{(1 - B_p)(1 - B_a)}{\frac{M}{C} + RTT} \frac{M}{C} = \frac{(1 - B_p)(1 - B_a)}{\frac{M}{C} + RTT} M$$

**11.4.- Calcule el valor óptimo del temporizador de retransmisión para un ARQ de rechazo selectivo y ventana de 4 paquetes, siendo el tamaño de paquete 1000 bits, la capacidad del enlace 1 Gbps y el RTT 100 ms.**

*Solución:*

*El temporizador debe ajustarse al valor del  $RTT + t_{tx}$ , esto es, unos 100 ms aproximadamente ya que el  $t_{tx}$  es 1us. Un valor superior originaría esperas innecesarias y un valor inferior ocasionaría retransmisiones innecesarias.*

*Sin embargo, si el RTT es variable, se debe poner un temporizador mayor que el RTT para que dé tiempo a que los paquetes se acepten o rechacen por los ACKs o NACKs.*

**TEMA 12: CONTROL DE ACCESO AL MEDIO**

**12.1.- Una red con canal compartido utiliza un mecanismo de Aloha puro para transmitir sus paquetes. Esta red la componen 10 estaciones que transmiten tramas de 1250 bits, y un canal compartido de 1Mbps de capacidad. Calcule:**

**a) El tráfico ofrecido por cada estación  $g$ , suponiendo que cada una ofrece al sistema  $a=2$  tramas por segundo.**

*Solución:*

*El tráfico ofrecido  $g$  por cada estación es el número de tramas ofrecidas por cada tiempo de transmisión de una trama  $T_{fr}$ . Esto es:*

$$T_{fr} = \frac{8 \times 1250 \text{ bits}}{10^6 \text{ bits/s}} = 10 \text{ ms. Este es el tiempo que dura una trama en transmitirse por el}$$

*canal compartido. Por lo tanto, el número de tramas ofrecidas por cada tiempo de trama será:*

$$g = aT_{fr} = 2 \text{ tramas/seg} \times 10 \text{ ms} = 0.02 \text{ tramas} / T_{fr}$$

**b) El tráfico total ofrecido en toda la red  $G$  y el tráfico realmente cursado  $S$ .**

*Solución:*

*El tráfico total ofrecido es:  $G = Ng = 10 \times 0.02 \text{ tramas} / T_{fr} = 0.2 \text{ tramas} / T_{fr}$  esto son 20 tramas/seg.*

*El tráfico realmente cursado será el tráfico ofrecido por la probabilidad de no colisión  $P_0$ :*

$$S = P_0 = Ng(1-g)^{2N-1} = 0.1362 \text{ o lo que es lo mismo un } 13.62\% \text{ de las tramas no sufrirán colisión.}$$

*En tramas por segundo sería  $0.1362 \times 20 \text{ tramas/seg} = 2.725 \text{ tramas/seg}$*

**c) Calcule la eficiencia del sistema si en lugar de 10 estaciones hubiera 100.**

*Solución:*

*La eficiencia del sistema se calcula obteniendo la probabilidad de no colisión  $P_0$ .*

$$S = P_0 = Ng(1-g)^{2N-1} = 100 \times 0.02 \times (1-0.02)^{199} = 0.0359 \text{ o un } 3.6\%, \text{ lo cual es un rendimiento muy pobre.}$$

*También se puede calcular a partir de la fórmula aproximada*

$$S = Ge^{-2G} = 2e^{-4} = 0.0366 \text{ ya que } G = Ng = 100 \times 0.02 \text{ tramas} / T_{fr} = 2 \text{ tramas} / T_{fr}$$

**12.2.- Calcule el rendimiento de una red Aloha ranurada donde  $N=10000$  estaciones comparten un canal de 1Mbps, y donde cada estación envía una trama de 100 bytes por minuto. Compare este resultado con el que se obtendría si se utilizara Aloha puro.**

*Solución:*

*En Aloha ranurado, el rendimiento se calcula con la ecuación  $S = Ge^{-G}$ .*

$$\text{El tiempo de trama en este enlace es: } T_{fr} = \frac{8 \times 100 \text{ bits}}{10^6 \text{ bits/s}} = 0.8 \text{ ms y, por tanto, el tráfico}$$

$$\text{generado por estación es: } g = aT_{fr} = 1 \text{ tramas} / 60 \text{ seg} \times 0.8 \text{ ms} = 1.33 \times 10^{-5} \text{ tramas} / T_{fr}.$$

*El tráfico total de la red es  $G = Ng = 0.133 \text{ tramas} / T_{fr}$ . Esto da lugar a un rendimiento:*

$$\text{Aloha puro: } S = Ge^{-2G} = 0.1021$$

$$\text{Aloha ranurado: } S = Ge^{-G} = 0.1167 \text{ que es superior al de Aloha puro}$$