E.T.S.I.I.T - Grado en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación

Redes de Comunicaciones

Curso 2023/2024

Tema 1 - Introducción
Hoja de problemas

Problema 1. Para una red JDP en su jerarquía primaria de 30+2, determinar el cociente $(S/N)_{\text{ley-A}}/(S/N)_{\text{lineal}}$ en todo el margen dinámico del cuantificador. Para ello evalúese el citado cociente en cada segmento de la ley-A, teniendo en cuenta que la relación S/N es proporcional al cuadrado del número de niveles cuando estos se encuentran equiespaciados. Finalmente efectúese el promedio de los cocientes, teniendo en cuenta que la función de densidad de probabilidad de la tensión instántanea de la señal vocal es exponencial (par) y que su varianza es $2\tau^2$. Supóngase además que el margen dinámico de los cuantificadores $(-V, +V)$ es igual a 20τ.

Problema 2. Considerar los siguientes parámetros de una red de conmutación:

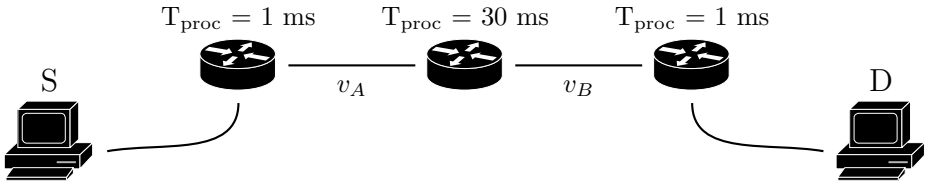
- N: número de saltos entre dos estaciones A y B.
- L: longitud total del mensaje en bits.
- B: velocidad en `bps` de todos los enlaces.
- P: tamaño del paquete en bits.
- H: número de bits de la cabecera.
- S: suma de los tiempos de establecimiento de la conexión previa a la transmisión (en modo conmutación de circuitos) y de liberación de esta conexión.
- D: retardo de propagación para cada enlace en segundos.

(a) Obtener una expresión del retardo total ocasionado al enviar un mensaje de A a B sobre una red de conmutación de circuitos y sobre una alternativa de conmutación de paquetes (datagrama). Determinar en qué condiciones el retardo en ambas estrategias será menor en función de L y N. Considerar que el retardo de procesado en los nodos de conmutación es insignificante.

(b) Calcular el valor de P en función de N, L y H que minimice el valor del retardo total para una red de conmutación de paquetes.

Problema 3. En una red de conmutación de paquetes se ha encontrado que la longitud media de los mensajes (L) es de 30 `Bytes` y el número medio de nodos (N) atravesados en un ruta es 2. Si el campo de cabecera (H) es de 3 `Bytes`, ¿cuál será la fragmentación óptima de los mensajes en esta red? Supóngase que todos los enlaces tienen igual capacidad de transmisión, siendo T el tiempo de transmisión de un octeto. Los retardos de propagación, procesado en los nodos y espera en colas de retransmisión se consideran despreciables.

Problema 4. Dada la red de conmutación de paquetes de la figura:



Si los paquetes que se transmiten tienen una longitud total de 256 `bytes`, cuál es la cadencia máxima de generación de paquetes entre S y D para las combinaciones de velocidades de transmisión de los enlaces que se indican en la tabla.

Supuesto	V_A (`kbps`)	V_B (`kbps`)
1	64	64
2	64	56
3	56	64
4	128	128

Problema 5. Una empresa dispone de diversas sucursales, cada una con un ordenador, y necesita actualizar, enviando a la central, la información almacenada en estos ordenadores. El volumen de datos que se transfiere desde una sucursal a la central en cada actualización es de 100 `Kbytes`.

Para disponer de este servicio, esta empresa se plantea la instalación de una red de datos que permita comunicar las sucursales con la central. Después de consultar a los posibles proveedores, se debe decidir entre dos opciones.

Opción A. Red de conmutación de circuitos

- Velocidad del circuito de 64 `Kbps`.
- Tiempo de establecimiento del circuito de 2 s.
- Tiempo de liberación del circuito de 1 s.
- Tiempo de propagación despreciable.

Opción B. Red de conmutación de paquetes

- Velocidad del enlace de acceso desde el terminal al nodo de conmutación de 64 `Kbps`.
- Los paquetes son de 256 `bytes`, formados por 20 `bytes` de cabecera y 236 `bytes` de datos de usuario.
- Tiempo de propagación despreciable.
- Tiempo de procesado del paquete despreciable.

Considerando que el sistema funciona correctamente sin congestión ni bloqueo, se pide responder las siguientes preguntas, razonando los parámetros que se eligen.

(a) Calcular el tiempo necesario para transmitir, desde una sucursal a la central, la información a actualizar en cada una de las opciones.

(b) Razonar cómo se podría modificar la peor de las opciones para conseguir mejorar el tiempo necesario para la actualización.

Problema 6. Una red de radioenlaces tiene las siguientes características:

- Número de nodos de conmutación $N = 21$.
- Velocidad de transmisión de cada enlace $B = 64$ `Kbps`.
- Distancia promedio entre enlaces $d = 30\ Km$.

Se quiere enviar un mensaje de longitud $L = 24000$ `bits`.
Calcular el tiempo total (desde que sale el primer bit del primer enlace hasta que es procesado el último bit en el último nodo de conmutación) suponiendo una funcionalidad:

- Conmutación de paquetes con encaminamiento datagrama, donde:
  - Longitud del paquete: $P = 1024$ `bits`.
  - Cabecera: $H_{dt} = 64$ `bits`.
  - Tiempo de procesado en cada nodo de conmutación: $T_{pdt} = 20\ ms$.
- Conmutación de paquetes con encaminamiento por circuito virtual, donde:
  - Longitud del paquete: $P = 1024$ `bits`.
  - Cabecera: $H_{cv} = 24$ `bits`.
  - Tiempo de procesado en cada nodo de conmutación: $T_{pcv} = 10\ ms$.
  - Tiempo de establecimiento de la conexión: $S = 0.5\ s$.

Suponer que en los dos casos los paquetes recorren el mismo camino, pasando por los $N-2$ nodos intermedios. Se asume además que no hay ningún tipo de error en la transmisión. La velocidad de propagación es $v_{prop} = 200\ km/ms$.

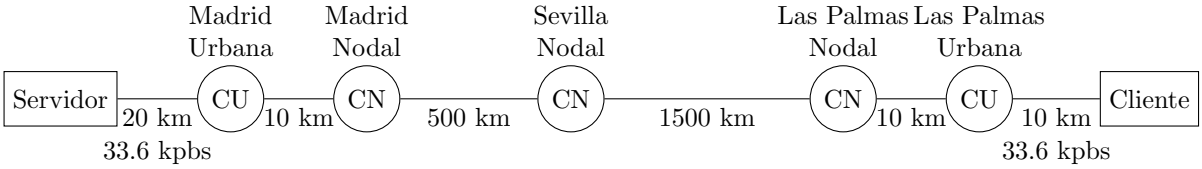
Problema 7. Se dispone de $N = 10$ estaciones conectadas a una red de velocidad $B = 1$ `Mbps`. Se quiere transferir un fichero de 55000 `bytes` de una estación a otra, separadas por una distancia eléctrica de $D = 1\ Km$.
El protocolo que se utiliza transmite la información en paquetes de $P = 256$ `bits`, que incluyen cabeceras de $H = 80$ `bits`, y espera un paquete de reconocimiento de 54 `bits` por cada paquete de información, antes de transmitir el siguiente.
La velocidad de propagación de la señal en el medio es de 200 $m/\mu s$ y el tiempo de procesado de los paquetes en las estaciones es despreciable. Considerar que no hay errores de transmisión ni colisiones.
Calcular el retardo total de transmisión del fichero y la velocidad efectiva (velocidad real a la que se transmite) si:

(a) Se utiliza una red con topología eléctrica de tipo bus en la que todas las estaciones conectadas pueden acceder a los paquetes que se transmiten sin introducir retardos.

(b) Se utiliza una red con topología eléctrica en anillo con una longitud eléctrica circular de 2D, donde las estaciones están equidistantes. Los paquetes circulan en un único sentido por el anillo, pasando de estación en estación. Estas estaciones actúan como meros **repetidores**, introduciendo un retardo correspondiente a un bit (esto es, cada bit que entra en una estación sale de ella con un retardo entrada-salida igual a un tiempo de bit, no habiendo por lo tanto almacenamiento del paquete). Cuando la estación destino recibe un paquete, lo retransmite de nuevo al origen añadiendo el paquete de reconocimiento a continuación.

Considerar para el cálculo del retardo que la estación origen es la uno y la destino es la seis.

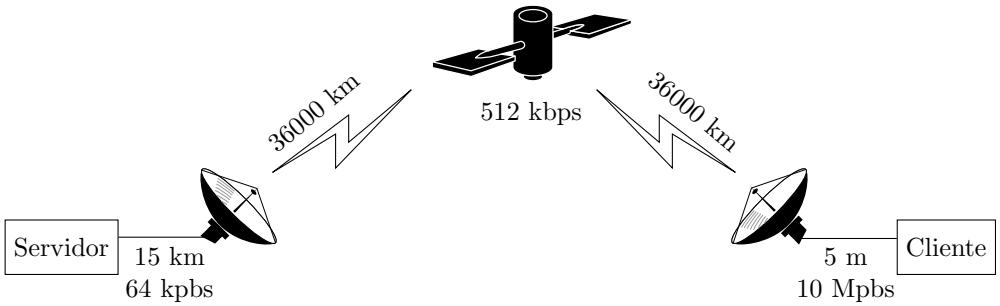
Problema 8. Una empresa establecida en las inmediaciones de Madrid se dedica a la difusión de información bursátil. Para ello su servidor transmite constantemente cotizaciones. Cada cotización se envía en un paquete de 100 `bytes`. Se considera prioritario que estos mensajes se entreguen con el menor retardo posible. Uno de los clientes de esta empresa se encuentra en Las Palmas de Gran Canaria.



Para darle servicio se utiliza la Red Telefónica Conmutada y modems de 33.6 `Kbps`, resultando la topología de la figura de arriba. Los enlaces entre centrales son multiplex TDM. Cada día se establece el circuito telefónico y se mantiene durante toda la jornada laboral.

(a) Calcular el retardo medio que tarda en llegar una cotización al cliente (desde la salida del primer bit del servidor hasta la llegada del último al cliente). *(Suponer que la velocidad de propagación es $v_{prop} = 200\ km/ms$).*

Se va a estudiar una opción alternativa basada en una red VSAT de conmutación de paquetes. En esta solución la empresa se conecta directamente al HUB de la red mediante una línea de 64 `Kbps`. En Las Palmas se instala un nodo VSAT junto al host el cliente y se conectan entre sí a 10 `Mbps`. La topología queda representada en la figura.



En esta configuración debe considerarse que en el HUB hay un tiempo medio de espera en cola de 10 ms (no incluye el tiempo de transmisión). Los enlaces con el satélite son de 512 `Kbps`. Suponer, además, que el tiempo de procesado en el satélite y en el VSAT de Las Palmas es despreciable.

(b) Repetir el apartado (a) para este caso, teniendo en cuenta que la velocidad de propagación en el enlace por satélite es la velocidad de la luz ($c = 300\ km/ms$).

Problema 9. Un host conectado a una red de conmutación de paquetes desea transmitir un mensaje a otro host conectado a la misma red. Los paquetes generados por el transmisor pasan por 2 nodos intermedios (routers) que están conectados entre sí por una línea de 2048 `Kbps` y 3 Km de longitud. Los enlaces de abonado son digitales a 64 `Kbps` y de 3 Km de longitud.

El software de comunicaciones se estructura según la arquitectura OSI. La *Service Data Unit* (SDU) del servicio del Nivel de Presentación es de 900 `Bytes` de longitud. Las *Protocol Data Unit* (PDU) de cada nivel, excepto el Físico, añaden una sobrecarga de 20 `Bytes` a su correspondiente SDU.

El mensaje que se desea transmitir usando el servicio del Nivel de Presentación es de 2700 `bytes`. La velocidad de propagación de los medios físicos es de 200000 Km/s.

Sabiendo que:

- Toda la arquitectura de red trabaja en modo no orientado a la conexión.
- El nivel de enlace de los hosts y de los routers emplea un protocolo de 'parada y espera'; es decir, se transmite un paquete después de recibir el asentimiento del anterior.
- La PDU de asentimiento (ACK) del Nivel de Enlace es de 50 `Bytes` de longitud.
- La tasa de error de bit que ofrece el Nivel Físico es despreciable.
- La carga de la red es tal que la longitud de las colas en los nodos intermedios es despreciable.

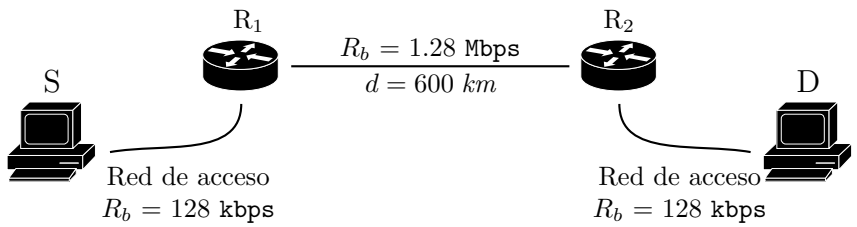
Se pide:

(a) Calcular la longitud de las SDUs del Nivel de Enlace y el número de ellas que se necesitan para enviar el mensaje.

(b) Calcular el tiempo entre la transmisión de dos PDUs de Nivel de Enlace consecutivas en el enlace de abonado. Este tiempo es el que transcurre desde que se comienza a transmitir el primer bit de una PDU hasta que se comienza a transmitir el primero de la siguiente.

(c) Calcular el retardo del mensaje entre dos hosts (desde que se empieza a transmitir en un host hasta que se recibe completamente en el otro).

Problema 10. Se considera la red de la figura:



En las secciones de acceso se cuenta con líneas de capacidad 128 `kbps` y, dado que la distancia con el nodo de red es reducida, el tiempo de propagación puede considerarse despreciable. Por su parte, la línea que une R_1 y R_2 (L) tiene una capacidad de 1.28 `Mbps`, con una longitud de 600 km. El tamaño máximo de paquete que se puede transmitir (incluyendo todas las cabeceras) es de 800 `Bytes`.

(a) Asumiendo que el tiempo de procesado en los nodos de red (R_1 y R_2) es de 6 ms y que el retardo de propagación en L es de 5 $\mu s/km$, calcular el tiempo que se necesita para transmitir entre los dos terminales (S y D) un paquete de tamaño máximo. *Nota: El procesado comienza tras recibirse completamente un paquete.*

(b) Calcular el tiempo necesario para transmitir M paquetes de longitud máxima entre S y D, en función de M.

Se pretende transmitir un fichero entre S y D, con un tamaño total de 148000 `Bytes`. Teniendo en cuenta que las longitudes de las cabeceras que se emplean durante la comunicación tienen una longitud de 20 `Bytes` para cada uno de los tres niveles utilizados (transporte, red y MAC/PHY), se pide:

(c) Calcular el tiempo necesario para transmitir el fichero completo.

(d) Se decide emplear un protocolo para controlar el flujo al que se transmiten paquetes; para ello la aplicación en el receptor (D), envía un reconocimiento (ACK) de 4 `Bytes` tras recibir W paquetes consecutivos desde S, que no puede seguir generando paquetes hasta recibir dicho ACK. Calcular el tiempo necesario para enviar el fichero cuando W vale 1 y 4. Comentar los resultados, comparándolos con los del apartado anterior.

Problema 11. Se pretende enviar un fichero de 75000 `Bytes` entre dos estaciones S y D. La estación S está conectada al nodo R_1, a través de una línea de 128 `kbps`, mientras que D tiene una conexión de 64 `kbps` con el nodo R_2. Se supone, además, que entre R_1 y R_2 hay un enlace dedicado, con una capacidad de 640 `kbps` y una longitud de 1000 Km.

El tamaño máximo del paquete que se puede transmitir sobre dicha configuración de red es de 800 `Bytes`, incluyendo los 50 `Bytes` de todas las cabeceras que hay que considerar.

Teniendo en cuenta que los retardos de procesado en R_1 y R_2 son, en media, de 15 y 20 ms, respectivamente, y que el tiempo de propagación en las redes de acceso puede considerarse despreciable, se pide resolver, de manera justificada, los siguientes apartados.

(a) ¿Cuánto tiempo se necesita para transmitir un paquete de tamaño máximo entre las dos estaciones? ¿Cuál es la cadencia máxima a la que la fuente puede transmitir paquetes? *(Suponer que la velocidad de propagación en el enlace entre R_1 y R_2 es de 200 km/ms).*

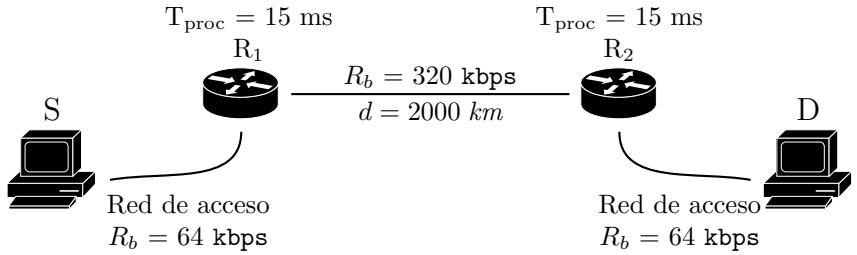
(b) Calcular el tiempo que se necesita para transmitir, entre S y D, M paquetes de tamaño máximo. *Nota: El procesado de un paquete en los nodos comienza tras recibirse su último bit.*

(c) Utilizar el resultado anterior para calcular el tiempo que se tardaría en transmitir el fichero.

Se decide emplear un protocolo para controlar el flujo al que se transmiten paquetes; para ello la aplicación en el receptor (D), envía un reconocimiento (ACK) de 50 `Bytes` (incluyendo las cabeceras de todas las capas) tras recibir W paquetes consecutivos desde S, que no puede seguir generando paquetes hasta recibir dicho ACK.

(d) Calcular el tiempo necesario para enviar el fichero cuando W vale 1 y 4. Comentar los resultados, comparándolos con los del apartado anterior.

Problema 12. Considérese la red de la figura.



(a) Suponiendo un tamaño de paquete de 400 `Bytes` y una velocidad de propagación de 200 km/ms, calcular el tiempo necesario para transmitir un paquete desde el transmisor al receptor, y la cadencia máxima de la fuente.

Repetir los cálculos del apartado (a) para los siguientes supuestos (sólo se modifica, respecto a la configuración inicial, lo que está indicado en cada caso).

(b) La velocidad en la red de accceso del transmisor se incrementa hasta los 128 `kbps`.

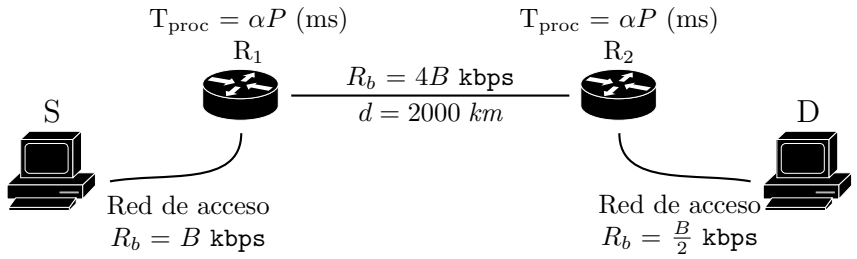
(c) El nodo $R2$ tiene que sustituirse temporalmente por un modelo más antiguo, y el tiempo de procesado se incrementa hasta los 65 ms.

(d) El enlace entre $R1$ y $R2$ se sustituye por un circuito vía satélite, de una longitud total de 2×36000 km *(ida y vuelta)*. (Suponer que el satélite no procesa ni almacena los paquetes **- simplemente los 'reenvía' -** y que la velocidad de propagación es, en este caso, de $v_{prop} = 300000$ km/s.)

*Considerar para la **cadencia** el tiempo que hay entre los primeros bits de dos paquetes consecutivos en la fuente.*

Nota: *Suponer, en todos los apartados, que el retardo de propagación en las redes de acceso es despreciable.*

Problema 13. Considérese la red de la figura.



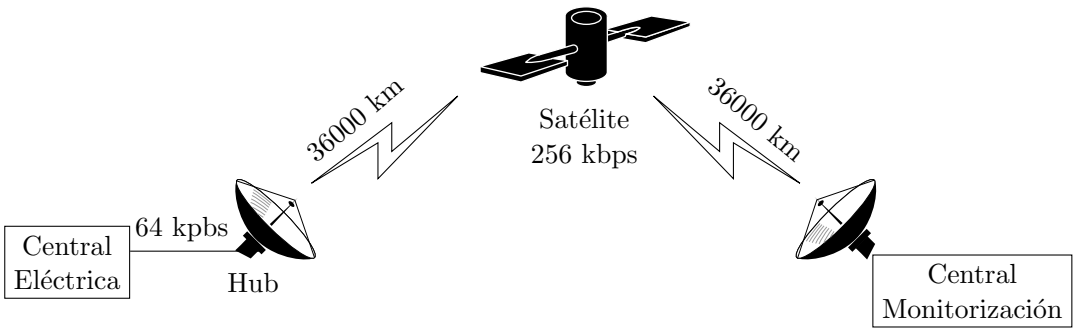
(a) Teniendo en cuenta que el retardo de procesado en $R1$ y $R2$ depende linealmente de la longitud de paquete según un parámetro α: $(t_{proc})^{(R1)} = (t_{proc})^{(R2)} = \alpha P$, se pide establecer el tamaño de paquete óptimo para enviar un mensaje de longitud L, sabiendo que es necesario emplear una cabecera de longitud H. ***Nota:*** *Asumir que todas las unidades son coherentes (bits y milisegundos) y que el retardo de procesado es menor, en cualquier caso, que el tiempo de transmisión.*

(b) ¿Cuánto tiempo se tardará, con la configuración encontrada anteriormente, en enviar un mensaje de 100 `Bytes`, si $B = 40$ `kbps` y $\alpha = 2^{-6}$ *ms/bit*? *Asumir que la velocidad de propagación es de* 200 *km/ms y que la cabecera tiene una longitud de* 5 `Bytes`.

(c) ¿Cuál es el valor máximo de α para que el resultado anterior sea válido? Justificar la respuesta.

Nota: *Suponer, en todos los apartados, que el retardo de propagación en las redes de acceso es despreciable.*

Problema 14. Una compañía eléctrica tiene una central de monitorización en una zona poco poblada; pretendiendo reducir las intervenciones manuales en la misma, decide adquirir un equipo de actuación inteligente, que es capaz de reprogramarse a través de ficheros con una longitud de 53760 Bytes. Para hacérselos llegar, la empresa contrata una capacidad de 256 kbps a una compañía de comunicaciones por satélite. La conexión entre la sede central de la eléctrica y el *hub* se lleva a cabo a través de un canal de 64 kbps. La topología de la red empleada es la que se muestra en la figura.



El satélite actúa de mero **repetidor**, por lo que no procesa ni almacena los paquetes que le llegan, simplemente los reenvía, sin introducir ningún retraso adicional. Por su parte, el tiempo de procesado en el *hub* se puede considerar nulo. Se asume además que el retardo de propagación en la línea dedicada de 64 kpbs es despreciable, y que la distancia con el satélite (geoestacionario) es de 36000 km (la velocidad de propagación es la de la luz en el vacío, $c = 3 \cdot 10^8$ m/s).

Como se hace uso de un enlace satelital, se emplea un protocolo de control de errores, de manera que el receptor (situado en la estación de monitorización) envía un reconocimiento (ACK) de 32 Bytes a la fuente cuando le llega un paquete correcto. Si la longitud de los paquetes que se transmiten es de 480 Bytes (incluyendo la cabecera de 32 Bytes), se pide responder las siguientes cuestiones.

(a) Calcular el tiempo necesario para transmitir un paquete desde el transmisor al receptor (*tener en cuenta el tiempo necesario para que el ACK llegue a la fuente*).

(b) ¿Cuánto tiempo será necesario para transmitir el fichero de configuración completo?

La empresa decide modificar el protocolo de control de errores, para que sólo se envíe la confirmación tras la recepción correcta de W paquetes. Así, la fuente envía W paquetes de manera consecutiva, y permanece a la espera hasta recibir el correspondiente ACK.

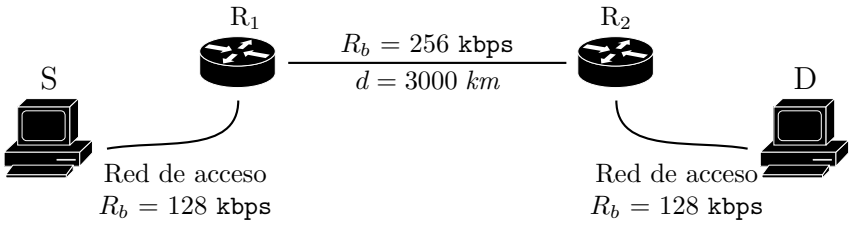
(c) Calcular el tiempo necesario para transmitir el fichero completo cuando $W = 4$ y 8.

Para reducir aún más el tiempo necesario para transmitir el fichero, la empresa decide modificar la red. Se contrata un canal de 64 kbps adicional entre el *hub* y su sede, y se modifica la configuración del enlace por satélite, de manera que haya 192 kbps en el enlace hacia la central de monitorización y 64 kbps en el de vuelta. De esta manera, la *transmisión de los reconocimientos* se puede hacer de manera completamente *simultánea* con la de datos en todos los enlaces que forman parte de la red. El destino confirma todos los paquetes recibidos uno a uno (esto es, manda un ACK por cada paquete recibido), y la fuente puede tener hasta W paquetes pendientes de confirmar.

(d) ¿Cuánto tiempo sería necesario para transmitir el fichero cuando $W = 2$?

(e) ¿Cuánto es el valor más pequeño de W que permite a la fuente transmitir de manera continua? ¿Cuánto tiempo se necesita para transmitir el fichero en ese caso?

Problema 15. Para conectar dos de sus sedes, una compañía tiene desplegada la red que se muestra en la figura.



El retardo de propagación en las redes de acceso se puede considerar despreciable, mientras que entre los nodos R_1 y R_2 se estima en 5 $\mu s/km$. Además, el tiempo de procesado en los nodos R_1 y R_2 puede considerarse también como nulo. Si la longitud de los paquetes que se transmiten es de 800 Bytes (incluyendo una cabecera de 40 Bytes), se pide responder las siguientes cuestiones.

(a) Calcular el tiempo necesario para transmitir un fichero de 95 KByte entre S y D. (*Se recuerda que* 1 *Kbyte se corresponde con* 2^{10} *bytes*).

Debido a las características del enlace dorsal (entre R_1 y R_2), se decide aplicar un protocolo de control de errores (nivel de enlace, entre estos nodos), según el cual se envía un paquete de reconocimiento (ACK) de 32 Bytes por cada paquete de datos recibido.

(b) Repetir el apartado (a) con este cambio en la configuración.
(c) ¿Cuál es la velocidad mínima necesaria en el enlace dorsal para que la fuente pueda usar una transmisión continua?

La empresa cambia la configuración del enlace dorsal, de manera que haya 200 kbps en el enlace entre R_1 y R_2 y 64 kbps en el de vuelta. De esta manera, la *transmisión de los reconocimientos* se puede hacer de manera completamente *simultánea* con la de los paquetes de datos. El destino (R_2) confirma todos los paquetes recibidos uno a uno (esto es, manda un ACK por cada paquete recibido), y la fuente (R_1) puede tener hasta W paquetes pendientes de confirmar.

(d) ¿Cuánto tiempo sería necesario para transmitir el fichero cuando $W = 1$?
(e) ¿Cuánto es el valor más pequeño de W que permite a la fuente transmitir de manera continua? ¿Cuánto tiempo se necesita para transmitir el fichero en ese caso?

Problema 16. Se dispone de dos terminales S y D que se pretende unir a través de una red de conmutación de paquetes. Cada uno de ellos se conecta a un nodo de la red (R_1 y R_N, respectivamente) a través de conexiones dedicadas de 128 `kbps`, en las que el retardo de propagación se puede considerar despreciable. Se asume que los enlaces entre nodos de la red tienen una capacidad de 512 `kbps` y una longitud media de 500 km. Si los paquetes que se transmiten tienen un tamaño de 800 `Bytes`, incluyendo una cabecera de 32 `Bytes`, se pide resolver las siguientes cuestiones.

(a) Se plantea inicialmente la utilización de una ruta que atraviesa un nodo adicional a los de conexión con las estaciones ($N = 3$). Si el retardo de procesado de todos ellos se estima en 30 *ms*, ¿cuánto tiempo se tardaría en transmitir un fichero de 150 `kBytes` entre S y D?
Asumir que el retardo de propagación es de 5 $\mu s/Km$.
Se recuerda que 1 `kByte` *se corresponde con* 2^{10} `Bytes`.

(b) Los ingenieros encargados de la gestión de red analizan la posilidad de utilizar una ruta con un enlace adicional ($N = 4$). ¿Cuál es el máximo retardo de procesado que podrían tener los nodos en esta alternativa para que los ingenieros se decantaran por ella? Calcular el tiempo necesario para transmitir el fichero cuando el procesado es igual a 10 *ms*. Comentar los resultados, analizando la diferencia en el tiempo necesario en ambas configuraciones.

En esta última configuración se decide incorporar un protocolo de control de flujo en cada uno de los enlaces de la red dorsal (entre R_1 y R_2, entre R_2 y R_3, etc). Así, tras recibir y procesar completamente un paquete, el nodo destino lo confirma con un ACK de 32 `Bytes`. El siguiente paquete sólo se podrá transmitir tras haber recibido el reconocimiento del anterior (los ACK no se tienen que procesar). Por otro lado, el tiempo de procesado de los 4 nodos crece hasta los 20 *ms*, debido a la funcionalidad adicional incorporada.

(c) ¿Cuál sería la velocidad mínima necesaria en los enlaces entre cada par de nodos para que la fuente pudiera utilizar transmisión continua?

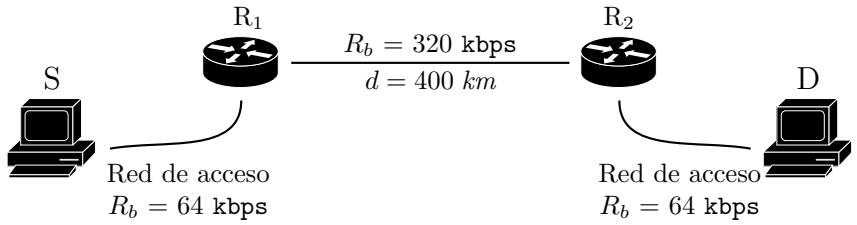
Finalmente, para ayudar al ingeniero de gestión a tomar una decisión apropiada, responder, de manera razonada, las dos cuestiones siguientes, partiendo de la configuración del apartado (a).

(d) ¿Se modificaría el tiempo total de transferencia del fichero si se añadieran más saltos en la ruta? ¿y la cadencia de la fuente?
Se define la cadencia como el inverso del tiempo entre los instantes de comienzo de la transmisión de dos paquetes consecutivos.

(e) Repetir el apartado anterior, considerando un aumento en la longitud media de cada enlace.

Problema 17. Considérese la red de la figura, que la compañía **LeXTeL** utiliza para enviar ficheros de configuración desde su central a estaciones de monitorización remotas.

Se sabe que los paquetes que se envían tienen una longitud de 400 `Bytes`, incluyendo una cabecera de 16 `Bytes`.



(a) Calcular el tiempo necesario para enviar un fichero de 150 `kBytes` entre S y D, si se supone que los *routers* $R1$ y $R2$ introducen un retardo de procesado de 15 *ms*.
Asumir que el retardo de propagación es de 5 $\mu s/Km$.
Se recuerda que 1 `kByte` *se corresponde con* 2^{10} `Bytes`.

(b) Repetir el apartado anterior si los ingenieros encargados de la gestión de red deciden emplear un protocolo de control de flujo en el enlace entre $R1$ y $R2$, de manera que por cada paquete se envía un reconocimiento de 40 `Bytes`. $R1$ no puede comenzar a transmitir el paquete siguiente hasta recibir el ACK del anterior.
Asumir que el tiempo de procesado del ACK en R1 es despreciable, y que R2 puede transmitir simultáneamente el paquete hacia D y el ACK hacia R1.

(c) Si el resto de parámetros se mantienen, ¿cuál es el tiempo de procesado máximo en los *routers* (el mismo para $R1$ y $R2$) para que la fuente pueda emplear transmisión continua?

(d) Manteniendo el resto de parámetros del apartado (a), ¿cuál es la velocidad de transmisión mínima necesaria en el enlace dorsal (entre $R1$ y $R2$) para que la fuente pueda emplear transmisión continua?

(e) **LeXTeL** decide emplear el protocolo anterior para comunicar la central con otras sedes. Asumiendo que se mantienen los retardos de procesado y la R_b del apartado (a), ¿cuál es la distancia máxima entre los dos *routers* para que la fuente pueda emplear transmisión continua?

(f) ¿Cuánto tiempo se tardaría en transmitir el fichero si la distancia entre $R1$ y $R2$ se incrementa hasta los 3600 *km*?

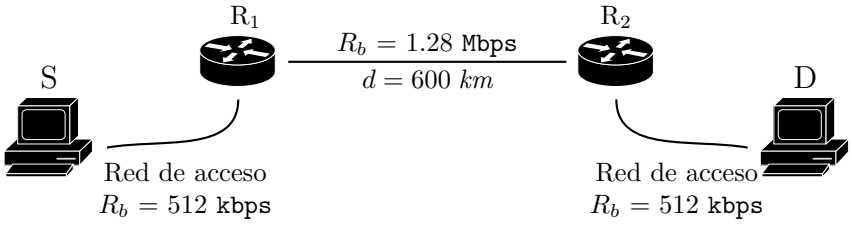
Problema 18. Una compañía pretende conectar dos de sus sedes mediante un único enlace (línea alquilada), que uniría los correspondientes *routers* de acceso R_1 y R_2, a los que se conectan las dos sedes, A y B respectivamente, con líneas de 512 `kbps`. Se supone que se contrata, para la línea entre R_1 y R_2, un grupo **E1**, con una capacidad de 2048 `kbps`, y que su longitud es de 400 *km*.

(a) Asumiendo que el retardo de procesado en R_1 y R_2 puede considerarse despreciable, calcular el tiempo que tardaría en en enviarse un fichero de 245 `KBytes` (*1* ***`KByte`*** *se corresponde con 1024* ***`Bytes`***) entre A y B, teniendo en cuenta que se utilizan paquetes de 1024 `Bytes`, incluyendo una cabecera de 44 `Bytes`. Asumir que los retardos de propagación en las redes de acceso son despreciables y que el retardo de propagación en el enlace $\overline{R_1\ R_2}$ es de 0.005 ms/Km.

(b) Tras la puesta en marcha de la red, los ingenieros de gestión deciden incorporar un esquema de monitorización, basado en el envío de paquetes de *probe*. Así cada vez que R_1 manda un mensaje de datos, envía a continuación un paquete sonda a R_2, que lo recibe, añade su propia información y se lo vuelve a enviar con el mismo tamaño; R_1 no puede transmitir el siguiente paquete de datos hasta haber recibido el *probe response* por parte de R_2. Asumiendo que el enlace entre R_1 y R_2 **no** es *full-duplex*, ¿cuál es el tamaño máximo del paquete de probe para que no afecte al

rendimiento calculado en el apartado (a)? ¿Cuál sería dicha longitud en el supuesto que el paquete le mandara inicialmente R_2, tras recibir un paquete de datos? En este caso R_1 mandaría la respuesta al *probe request* y, posteriormente, podría transmitir el siguiente paquete de datos.

Problema 19. Una compañía dispone de la configuración de red que se muestra en la figura para comunicar dos estaciones de monitorización S y D.



(a) ¿Cuál es el tiempo necesario para transmitir un fichero de 244 `KBytes` entre S y D, teniendo en cuenta que los protocolos involucrados añaden una sobrecarga de 48 `Bytes` por paquete, y que se transmiten paquetes de 1024 `Bytes` de longitud? Asumir que los retardos de propagación en las redes de acceso son despreciables y que el retardo de propagación en el enlace $\overline{R_1\ R_2}$ es de 0.005 ms/Km. ¿Cuál es el retardo de procesado máximo (por `bit`) que se podría permitir en el router R_1 para mantener la cadencia (inverso del tiempo entre paquetes consecutivos) utilizada previamente?

(b) Los ingenieros de red deciden incorporar un protocolo de control de flujo entre R_1 y R_2, para lo que contratan un enlace adicional de 64 `kbps` entre R_2 y R_1, de manera que los ACK se puedan transmitir de manera simultánea con los paquetes de datos. Teniendo en cuenta que la longitud de los paquetes de confirmación es de 128 `Bytes`, ¿qué ventana (número de paquetes transmitidos sin haber recibido confirmación) sería necesaria en R_1 para que se mantuviera el tiempo calculado en el apartado anterior?
Asumir, en este apartado, que el retardo de procesado en los routers es despreciable.

Problema 20. Considérense dos equipos S y D que se conectan a dos nodos R_1 y R_5 a través de sendas conexiones de 160 `kbps`. La capacidad del enlace entre R_1 y R_2 es de 200 `kbps`, su distancia es de 1200 km, y el procesado en los nodos se puede considerar despreciable.

(a) ¿Cuánto tiempo se tardaría en transmitir un fichero de 194 `kBytes` entre S y D? (recordar que 1 `kByte` se corresponde con 2^{10} `Bytes`). Considerar que los paquetes que se transmiten tienen una longitud de 800 `Bytes`, de los cuales 24 se corresponden con cabeceras de los protocolos involucrados, que el tiempo de propagación es despreciable en los enlaces $S \rightarrow R_1$ y $R_2 \rightarrow D$ y que $v_{\text{prop}} = 200\ km/ms$.

(b) Se asume ahora que los nodos R_1 y R_2 introducen un retardo de procesado que se puede modelar como $\gamma \cdot P$, donde γ es el retardo por bit (en μs) y P es la longitud del paquete (en `bits`). ¿Cuál es el valor máximo permitido para γ, si se pretende asegurar una transmisión continua?

(c) Se decide emplear un esquema de reconocimiento entre los nodos R_1 y R_2. Así, el nodo R_2 confirma con un ACK de 75 `Bytes` todos los paquetes recibidos, pero utiliza un enlace adicional $R_2 \rightarrow R_1$ (de 100 `kbps`), de manera que los ACK se puedan transmitir de manera simultánea con los datos. ¿Cuál sería la ventana (número de paquetes que se pueden tener sin confirmar) para que se pudiera mantener la transmisión continua en la fuente? Asumir que $\gamma = 0$ μs/bit es en este caso.

Problema 21. Se pretende analizar un despliegue de nodos IoT para monitorizar parámetros físicos. Uno de los sensores recoge la presión en uno de los pilares de un viaducto, por lo que es importante que los datos que obtiene se envíen adecuadamente al receptor final. Se considera que el sensor pizoeléctrico (p) toma muestras que encapsula en paquetes de 512 `Bytes`, enviándolos al nodo repetidor (R) a través de una conexión a 32 `kbps`. Este nodo reenvía la información a un *sink* (S) a través de un enlace IEEE 802.15.4 a una velocidad de 64 `kbps`. S, a su vez, lo envía al terminal (t) utilizando una conexión de 32 `kbps`. Las distancias de todos los enlaces son lo suficientemente cortos para no considerar el retardo de propagación.

(a) Asumiendo que el procesado en los nodos R y S es despreciable, ¿cuánto tiempo sería necesario para transmitir 5 muestras? ¿Cuál es la frecuencia máxima a la que se pueden tomar medidas (s^{-1})?

Tras la puesta en marcha de la red, se detecta que la conexión entre R y S presenta una tasa de error elevada, por lo que se decide utilizar alguna técnica de control de errores. En una primera alternativa, se decide que el nodo S, tras recibir un paquete generará un ACK, de 128 `Bytes`, que reenviará a R. Este no puede transmitir más información hasta haber recibido dicho ACK.

(b) Asumiendo que el procesado en R sigue siendo despreciable, ¿cuál podría ser el tiempo de procesado máximo en S (antes de generar el ACK) para poder mantener la frecuencia de monitorización calculada en el apartado anterior?

Los ingenieros se plantean el uso de una técnica tipo FEC, en la que se añade cierta redundancia al paquete para protegerlo ante posibles errores en el enlace $R \rightarrow S$. Así, al recibir un paquete, R lo codifica, para lo que invierte un tiempo $\alpha\mathcal{L}$, siendo $\mathcal{L}$ la longitud del paquete que recibe (512 `Bytes`) y α el retardo de procesado ($\frac{ms}{\texttt{bit}}$). El paquete que transmite R tiene una longitud (debido a la sobrecarga del código FEC) $\mathcal{L}' = \frac{4}{3}\mathcal{L}$. Finalmente, el procesado en S será $\beta\mathcal{L}'$; tras este procesado, S envía paquetes de longitud $\mathcal{L}$ a t (esto es, aquellos generados por p).

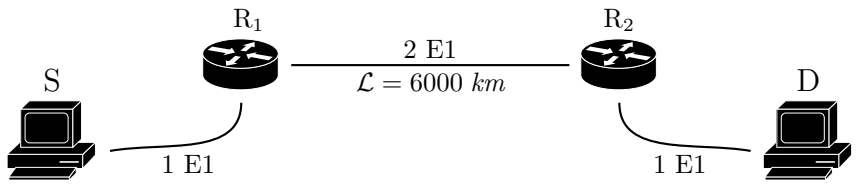
(c) Asumiendo que $\alpha = \beta$, ¿qué valor máximo podrán tener estos parámetros para mantener la cadencia calculada en el apartado (a)? ¿Cuánto tiempo se tardaría en transmitir 5 muestras entre p y t si $\alpha = \beta = 20\ \frac{\mu s}{\texttt{bit}}$?

Problema 22. Una empresa de logística despliega un conjunto de sensores para monitorizar las condiciones ambientales en una de sus naves. Cada dispositivo sensor es capaz de medir cuatro parámetros físicos. Un parámetro físico se encapsula en un paquete de 24 `Bytes`, que se envía por un enlace de 16 `kbps` a un concentrador que lo procesa antes de reenviarlo al router de la sede central, para lo que utiliza un enlace dedicado de 128 `kbps`. Finalmente, se utiliza una conexión de 64 `kbps` para transmitir el paquete a la estación de gestión. Ésta envía un reconocimiento de 16 `Bytes` al nodo sensor, que no puede transmitir más medidas hasta haber recibido confirmación de la anterior.

(a) Asumiendo que el tiempo de procesado en el concentrador para el paquete de datos es de 10 *ms* y que el retardo de propagación en el enlace dedicado es de 3 *ms*, calcular el tiempo necesario para completar (incluyendo la recepción del reconocimiento) el envío de una medida. ¿Cuál es la frecuencia a la que se puede monitorizar cada uno de los cuatro parámetros si se van midiendo uno a uno manteniendo siempre el mismo orden?
Considerar que el resto de tiempos de procesado (tanto para el paquete de datos como para la confirmación) y de propagación son despreciables.

(b) Para incrementar la frecuencia anterior, se decide *agrupar* las medidas; así el nodo sensor encapsulará los registros de k parámetros ($k = 1 \ldots 4$) y la estación de gestión confirmará todas las medidas en un único reconocimiento. Se supone que la longitud del paquete que se transmite pasa a ser de $16+8k$ `Bytes` y que el tiempo de procesado en el concentrador será $8k + 2$ *ms*. ¿Con qué frecuencia se pueden tomar las medidas de cada uno de los cuatro parámetros para $k = 2$? ¿Y para $k = 4$?

Problema 23. Se pretende analizar el comportamiento de un sistema de telecomunicaciones que utiliza un cable transatlántico de 6000 *km* para comunicar Europa y Estados Unidos. Se asume que la estación fuente (S) se comunica con un primer nodo a través de un acceso con 1 grupo E1 (se recuerda que un grupo E1 tiene una capacidad de 2.048 `Mpbs`). El enlace dedicado que se contrata para unir los dos nodos es de 2 grupos E1 y posteriormente se utiliza otro acceso, también de 1 grupo E1, para llegar a la estación destino D, tal y como se muestra en la topología de la figura.



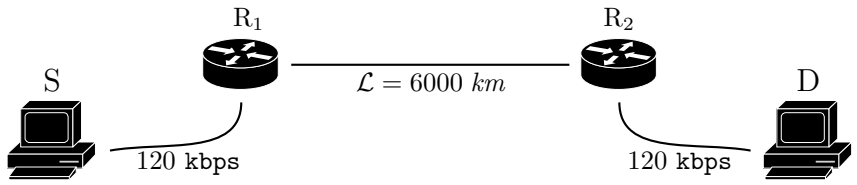
(a) Asumiendo que el procesado en los nodos R_1 y R_2 es despreciable, ¿cuánto tiempo sería necesario para transmitir un fichero de 45 `MBytes`, si se utilizan paquetes de 1024 `Bytes`, que incluyen una cabecera de 64 `Bytes`?
Se recuerda que 1 `MByte` *son* 2^{20} `Bytes`*.*
Asumir que la velocidad de propagación es 200 km/ms.

(b) ¿Cuál de las siguientes situaciones modificaría la cadencia a la que la fuente podría transmitir paquetes según los datos del apartado anterior? Indicar SI / NO según corresponda en cada caso.

Procesado R_1 $t_{\text{proc}} = 2\ ms$	Procesado R_2 $t_{\text{proc}} = 5\ ms$	Longitud cable $\mathcal{L} = 8000$ km	Capacidad $R_2 \rightarrow D$ 3 grupos E1	Capacidad $R_2 \rightarrow D$ 1024 `kbps`	Nuevo enlace entre S y R_1, sin procesado y capacidad 2 E1

(c) A partir de la configuración original, se decide utilizar un esquema de control de flujo en en enlace transatlántico, de manera que el nodo R_2 envía paquetes de reconocimiento de 256 `Bytes` a R_1, para cada paquete recibido. Utiliza para ello una conexión dedicada, con capacidad 1 grupo E1, de manera que los ACK se transmiten de manera simultánea con los paquetes de datos. ¿Cuál debería ser la ventana de transmisión en R_1 (esto es, el número de paquetes que pueden transmitirse sin recibir reconocimiento) para mantener el resultado del apartado (a)?

Problema 24. Considérese la red de la figura, sobre la que se envían paquetes con una longitud de 1500 `Bytes`.



Se pretende utilizar un protocolo de control de flujo y errores en el enlace semi-dúplex entre R_1 y R_2, según el cual R_2 confirma todos los paquetes recibidos con un reconocimiento de 500 `Bytes`.

(a) ¿Cuál es la capacidad mínima necesaria en dicho enlace para que S pueda utilizar transmisión continua?
Asumir que la velocidad de propagación es de 200 km/ms *y que el retardo de propagación en las secciones de acceso es despreciable.*

(b) Indicar las modificaciones necesarias para mantener dicha transmisión continua incluso si la capacidad del enlace $\overrightarrow{R_1R_2}$ fuera menor.

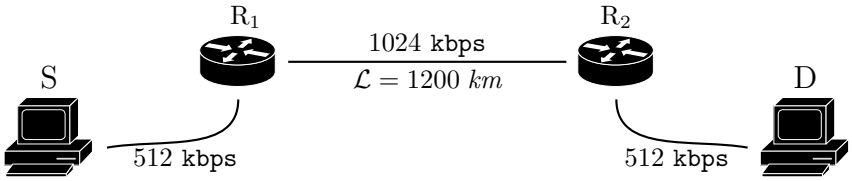
Problema 25. En un despliegue WSN, un sensor S tiene que enviar medidas en paquetes de 24 `Bytes` a un *Gateway*, G. Para ello tiene que pasar por N nodos intermedios. Se supone que la velocidad de transmisión es 64 `kbps`, y que las distancias de cada enlace son cortas, por lo que se pueden despreciar todos los retardos de propagación.

(a) Calcular el tiempo que tarda una medida en llegar a G, desde que se comienza a transmitir en S, si se utiliza un único nodo intermedio, con un tiempo de procesado de 16 ms. ¿Con qué frecuencia podría tomar medidas el sensor con esta configuración?

(b) Se determina que el retardo de procesado en los nodos intermedios se puede estimar como $t_{\text{proc}}\ (ms) = \frac{16}{N^4}$. ¿Cuánto tardaría una muestra en llegar de S a G cuando $N = 4$? ¿Con qué frecuencia se podrían tomar muestras en este caso?

(c) ¿Cuál es el retardo mínimo (tiempo para que una medida llegue de S a G) que se podría conseguir?

Problema 26. Considérese la red de la figura.

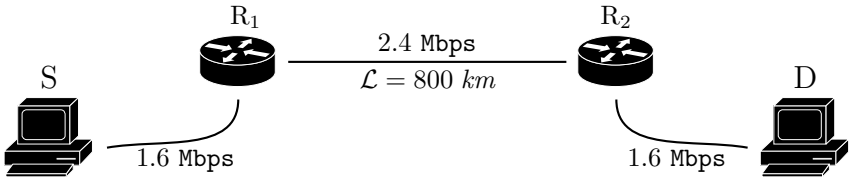


Se asume que los paquetes que se envían son de 128 `Bytes` (incluyendo una cabecera de 24 `Bytes`), y que el retardo de procesado en R_1 y R_2 es despreciable. Entre los nodos R_1 y R_2 se establece un protocolo de control de flujo, de manera que R_1 no puede transmitir un paquete hasta haber recibido confirmación de que el anterior llegó correctamente a R_2. Dicho ACK consiste en la transmisión de una copia del mensaje recibido.

(a) ¿Cuánto tiempo se tardaría en transmitir un fichero de 20800 `Bytes` entre S y D, asumiendo que el retardo de propagación en las redes de acceso es despreciable, y que la velocidad de propagación en el enlace dorsal es $v_{\text{prop}} = 200\ km/ms$? En esta primera configuración se supone que el enlace entre R_1 y R_2 es *semi-dúplex*.

(b) Se cambia la configuración del enlance dorsal, que pasa a ser *full-dúplex*, de manera que los ACK se pueden transmitir de manera simultánea con los paquetes de datos. ¿Cuál debería ser la ventana de transmisión en R_1 (esto es, el número de paquetes que pueden transmitirse sin recibir reconocimiento) para que S pueda utilizar transmisión continua? ¿Cuál sería el tiempo de transmisión del fichero en este caso?

Problema 27. Considérese la red de la figura.



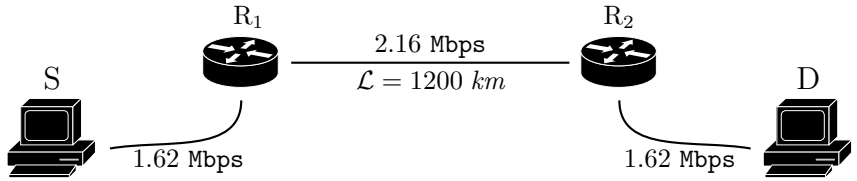
Se asume que los paquetes que se envían son de 900 `Bytes` (incluyendo una cabecera de 40 `Bytes`), y que el retardo de procesado en R_1 y R_2 es despreciable.

(a) ¿Cuánto tiempo se tardaría en transmitir un fichero de 21500 `Bytes` entre S y D, asumiendo que el retardo de propagación en las redes de acceso es despreciable, y que la velocidad de propagación en el enlace dorsal es $v_{\text{prop}} = 200\ km/ms$?

(b) Debido al deterioro de la señal en el enlace dorsal se decide incorporar, en el punto medio, un regenerador. Éste, tras recibir cada paquete, añade un cierto retardo de procesado, χ. Calcular el tiempo que se tarda en enviar el fichero, si se asume que $\chi = 6\ ms$. ¿Cuál sería el valor máximo de χ que permitiría mantener la transmisión continua?

(c) Se decide además incorporar un protocolo de control de errores entre R_1 y R_2, de manera que R_2 envía a R_1 una copia de cada paquete recibido a modo de *ack*. Además, se establece que R_1 puede mandar ω paquetes (ventana) sin recibir confirmación. Si se asume que R_2 confirma todos los paquetes recibidos, y que el enlace dorsal es *full-dúplex*, ¿cuál es el valor de ω que permite mantener la transmisión continua en la fuente? En este caso, asumir que $\chi = 4\ ms$, y que se utiliza otro regenerador idéntico para el sentido $R_2 \rightarrow R_1$. ¿Sería posible mantener el mismo rendimiento si $\chi = 6\ ms$?

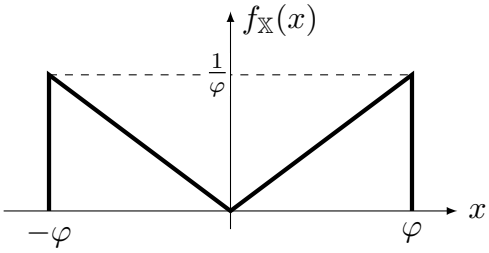
Problema 28. Considérese la red de la figura, en la que se supone que el enlace dorsal, entre R_1 y R_2, es *full-duplex* (bidireccional simultáneo). Se establece un esquema de reconocimiento entre esos nodos, en el que R_2 confirma todos los paquetes recibidos de R_1, enviando una copia de los mismos. Además, se utiliza una ventana, ω, de manera que R_1 puede mandar ω paquetes consecutivos sin recibir confirmación por parte de R_2. La fuente envía paquetes de 810 `Bytes` (incluyendo una cabecera de 30 `Bytes`), y el retardo de procesado en R_1 y R_2 es despreciable.



(a) Si se utiliza un valor de $\omega = 3$, ¿cuánto tiempo se tardaría en transmitir un fichero de 46800 `Bytes` entre S y D, asumiendo que el retardo de propagación en las redes de acceso es despreciable, y que la velocidad de propagación en el enlace dorsal es $v_{\text{prop}} = 200\ km/ms$? ¿Cuál es la tasa efectiva de la comunicación?
Asumir que S es capaz de adaptar sus transmisiones (cada paquete que envía), de manera que R_1 no tenga que mantener paquetes en espera.

(b) ¿Cuál sería dicho tiempo si se pudiera utilizar transmisión continua en la fuente? ¿Cuál es el mínimo valor de ω que lo permitiría?

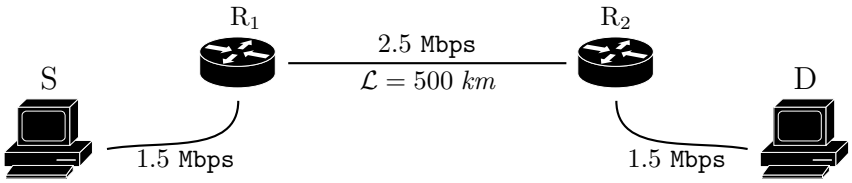
Problema 29. Se va a utilizar un cuantificador uniforme para digitalizar una señal analógica cuya función densidad de probabilidad $f_{\mathbb{X}}(x)$ es la que se representa en la figura.



(a) ¿Cuál es la SNR (de cuantificación), si se utilizan 3 bits en el cuantificador, y se asume que su rango cubre exactamente el de la señal de entrada: $[-\varphi, \varphi]$? Asumir en este primer apartado que el ruido de cuantificación en cada intervalo se distribuye uniformemente entre $-\frac{q}{2}$ y $\frac{q}{2}$, siendo q la longitud de un intervalo del cuantificador.

(b) Indicar cómo se podría haber hecho un cálculo más preciso de la SNR de cuantificación.

Problema 30. Considérese la red de la figura.



Se asume que los paquetes que se envían son de 750 `Bytes` (incluyendo una cabecera de 50 `Bytes`), y que el retardo de procesado en R_1 y R_2 es despreciable. Se decide incorporar un protocolo de control de flujo entre R_1 y R_2, de manera que R_2 envía un ACK de 125 `Bytes` cada dos paquetes de datos, y R_1 no puede enviar más información hasta recibirlo.

(a) Si el enlace entre R_1 y R_2 es *semi-dúplex*, ¿cuánto tiempo se tardaría en transmitir un fichero de 84000 `Bytes` entre S y D, asumiendo que el retardo de propagación en las redes de acceso es despreciable, y que la velocidad de propagación en el enlace dorsal es $v_{\text{prop}} = 200\ km/ms$?

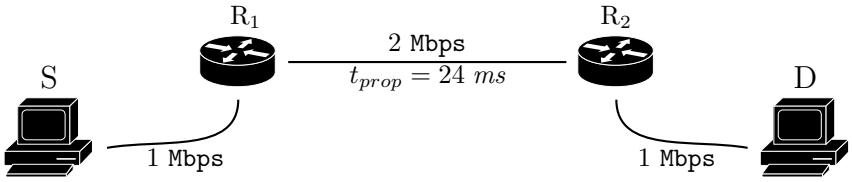
(b) Se modifica la configuración del enlace dorsal entre R_1 y R_2, para que sea *full-dúplex*. Si R_1 pudiera enviar ω paquetes sin confirmación, ¿cuál es el valor de ω que permitiría transmisión continua en la fuente? ¿Cuánto se tardaría en enviar el fichero en este caso?

Problema 31. Se pretende enviar un mensaje de longitud L `Bytes` entre S y D, para lo que se atraviesan N nodos intermedios, que procesan los paquetes recibidos antes de reenviarlos. El protocolo utilizado emplea una cabecera de H `Bytes`. La velocidad de transmisión en todos los enlaces es de B `Bytes`$/s$, y el retardo de procesado en cada

nodo intermedio es α s/`Byte`. Se asume además que el retardo de propagación se puede considerar despreciable en todos los enlaces, y que el tiempo de procesado es inferior al de transmisión.

(a) Obtener la expresión que permita establecer el tamaño de paquete que se debería utilizar para minimizar el tiempo total necesario para transferir el mensaje.
(b) Utilizar la expresión anterior para calcular el tiempo total con los siguientes parámetros: $B = 8000$ `Bytes`/s, $H = 8$ `Bytes`, $L = 300000$ `Bytes`, $\alpha = \frac{1}{32000}$ s/`Byte`, $N = 3$. ¿Cuál sería el tiempo necesario si se tuviera que atravesar 10 nodos intermedios y α pasara a ser $\alpha = \frac{1}{16000}$ s/`Byte`?

Problema 32. Considerar la red de la figura. Se asume que los retardos de procesado en todos los nodos, y de propagación en los enlaces de acceso son despreciables.



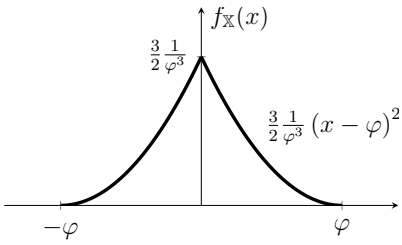
Se utiliza una configuración *semi-dúplex* en el enlace entre R_1 y R_2, sobre el que se utiliza un esquema de control de flujo, de manera que R_1 envía ω paquetes, y se queda esperando a recibir la confirmación por parte de R_2, que es una copia del último paquete recibido, antes de poder transmitir el siguiente. Se envían paquetes de 1000 Bytes, que incluyen todas las cabeceras necesarias, de 40 Bytes.

(a) Establecer la cadencia (en paquetes por segundo) a la que puede trabajar el nodo S, si $\omega = 4$. ¿Qué reducción hay frente a la cadencia máxima de la fuente? ¿Cuánto tiempo se necesitaría para enviar un fichero de 450 `kBytes`? ¿Qué valor debería tener ω para poder alcanzar la máxima cadencia de la fuente?
Se recuerda que 1 ***`kByte`*** *son* 2^{10} ***`Bytes`***.

Se decide mejorar el enlace dorsal, que pasa a ser *full-dúplex*, con la misma velocidad (2 `Mbps` en cada sentido).

(b) Volver a calcular la cadencia de la fuente, si R_1 sigue usando el mismo valor de ω que en el apartado anterior. Asumir que R_2 manda un ACK cada $\delta = 4$ paquetes recibidos. ¿Cuál sería la cadencia si R_2 enviara un ACK cada 2 paquetes? Establecer, en ambos casos, el tiempo que tardaría en transmitir el fichero.
(c) Calcular el valor de ω que le permitiría a la fuente usar su cadencia máxima para los dos valores de δ del apartado anterior? ¿Qué tiempo se necesitaría para transmitir el fichero en este caso?

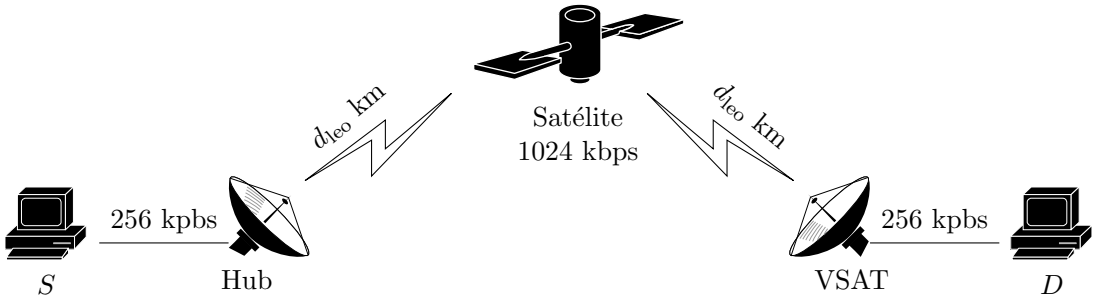
Problema 33. Se quiere digitalizar la señal analógica, cuya función densidad de probabilidad $f_{\mathbb{X}}(x)$ es la que se representa en la figura.



(a) Calcular la relación Señal a Ruido de Cuantificación, utilizando un cuantificador uniforme de 2 bits, cuyo rango cubre exactamente el de la señal de entrada: $[-\varphi, \varphi]$ Asumir que el ruido de cuantificación en cada intervalo se distribuye uniformemente entre $-\frac{q}{2}$ y $\frac{q}{2}$, siendo q la longitud de un intervalo del cuantificador.

(b) Proponer, de manera razonada, un cuantificador que pudiera mejorar la SNR del uniforme (sin utilizar más bits).

Problema 34. Un empresa utiliza un servicio de comunicación a través de satélites LEO (Low Earth Orbit). Se considera la red de la figura, que se utiliza para enviar ficheros de 20000 `Bytes`.



Se asume que los paquetes que se envían son de 128 `Bytes` (incluyendo una cabecera de 28 `Bytes`), y que el retardo de procesado en todos los nodos es despreciable, así como el de propagación en los enlaces de acceso. Se decide incorporar un protocolo de control de flujo en los dos enlaces satelitales, de manera que se envía una copia de cada paquete recibido, a modo de ACK.

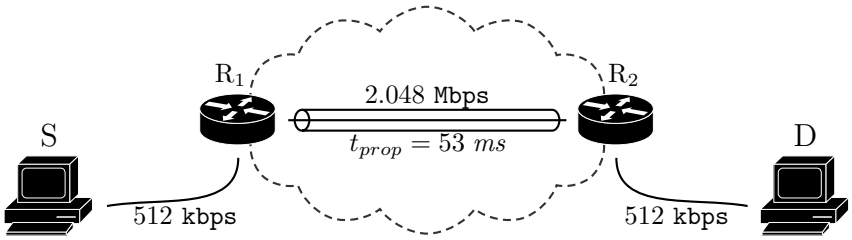
(a) Inicialmente, ambos enlaces satelitales están configurados en modo *semi-dúplex*, utilizando una órbita LEO de 900 *km*. ¿Cuánto tiempo se necesitaría para transmitir completamente el fichero entre S y D? ¿Cuál sería la altura máxima de la órbita para que la fuente pudiera utilizar transmisión continua? ¿Cuál sería el tiempo necesario para transmitir el fichero en este caso?
Asumir que la velocidad de propagación es la de la luz: $c = 300\ km/ms$

(b) Como solución alternativa se decide modificar la configuración de ambos enlaces satelitales, que pasan a ser *full-dúplex*, aunque la órbita pasa a ser de 1050 *km*.

Inicialmente se establece una ventana $\omega^\dagger = 2$. ¿Cuánto tiempo tardaría en enviar el fichero? ¿Cuál sería el valor de ω que permitiría transmisión continua en la fuente? ¿Cuánto se tardaría en enviar el fichero en este caso?

† *El número máximo de paquetes que se pueden enviar sin haber recibido confirmación.*

Problema 35. Considerar la red de la figura. Se quiere analizar el tiempo necesario para transmitir un fichero de 225 kbytes *(Se recuerda que 1 kbyte son* 2^{10} *bytes)*. Se asume que el tiempo de procesado de los dos routers de acceso es despreciable, así como el retardo de propagación en los enlaces correspondientes.



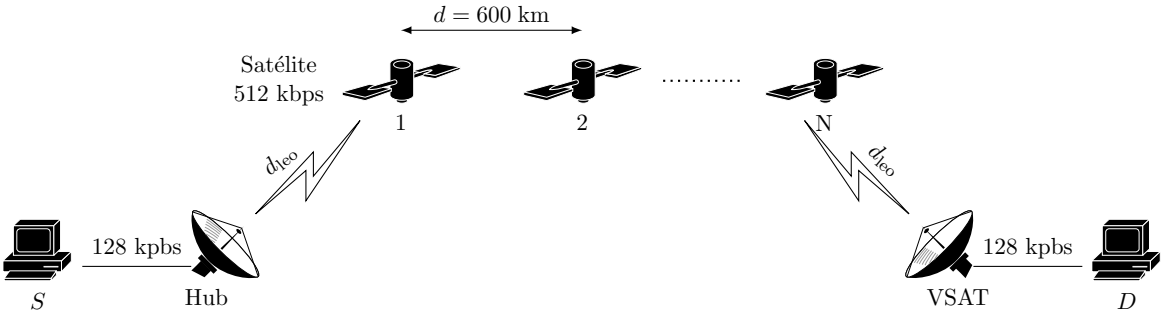
El protocolo de trasporte utilizado establece un control de congestión end-to-end, por el que el receptor envía un paquete de confirmación (ack) cada dos paquetes de datos. Se supone además que la fuente envía paquetes de 1024 bytes, incluyendo una cabecera de 64 bytes, y que los ack tienen un tamaño total de 256 bytes.

(a) Calcular el tiempo necesario para transmitir el fichero, si se asume un comportamiento *semi-dúplex* de todos los enlaces, y la fuente puede enviar $\omega = 2$ paquetes sin recibir confirmación.

(b) ¿Cuál sería dicho tiempo, si los enlaces pasaran a ser *full-dúplex* (bidireccional-simultáneo), y la fuente pudiera enviar $\omega = 4$ paquetes sin recibir confirmación?

(c) ¿Qué valor de ω permitiría a la fuente transmitir de manera continua? ¿Cuánto tiempo tardaría en enviar el fichero en este caso?

Problema 36. Considerar la topología de la figura, que se utiliza para enviar datos desde una estación de monitorización remota, utilizando una red de satélites LEO.



Se asume que los paquetes que se envían son de 256 *Bytes*, y que el retardo de procesado en todos los nodos es despreciable, así como el de propagación en los enlaces de acceso. En

todos los enlaces satelitales, incluyendo los que se establecen con las estaciones terrenas, la capacidad es de 512 *kbps*. Se sabe además que la longitud media de los enlaces satelitales (entre los nodos que están en órbita) es de 600 km, independientemente de la distancia a la que se sitúen de la superficie de la Tierra. En una configuración inicial se decide utilizar una órbita a una distancia $d_{\text{leo}} = 1800\ km$ de la superficie de la Tierra.

Se utiliza un protocolo de control de flujo *stop & wait* en todos los enlaces satelitales (incluyendo los dos con las estaciones terrenas, Hub y VSAT), de manera que el transmisor no podrá enviar un paquete hasta haber recibido confirmación del anterior, que consiste en un paquete de 128 *Bytes*.

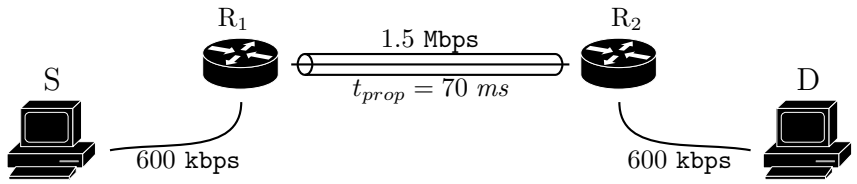
(a) Calcular el tiempo necesario para enviar un paquete al destino en función de N, número de satélites LEO.

(b) ¿Cuál sería la cadencia máxima (en s^{-1}) que se podría alcanzar? ¿Cuál sería la altura máxima de dicha órbita para que la fuente pudiera utilizar transmisión continua? ¿Depende este resultado del número de satélites LEO que sea necesario atravesar?

(c) Finalmente se utilizan 3 satélites, que se sitúan a una órbita cuya altura es de $d_{\text{leo}} = 1200\ km$. ¿Cuánto tiempo se tardaría en enviar M paquetes entre S y D? ¿Cuál sería dicho tiempo si se utilizara la altura original de 1800 km?

Asumir que la velocidad de propagación es la de la luz: $c = 300\ km/ms$

Problema 37. Se pretende transmitir un fichero de 362 kbytes *(Se recuerda que 1 kbyte son* 2^{10} *bytes)* entre S y D en la red de la figura, en la que todos los enlaces están configurados en modo *full-duplex*. Se asume que el retardo de propagación en los enlaces de acceso es despreciable. Además, el retardo de procesado en los nodos R_1 y R_2 también puede considerarse despreciable. El nodo S envía paquetes de 1500 bytes, incluyendo una cabecera de 52 bytes.



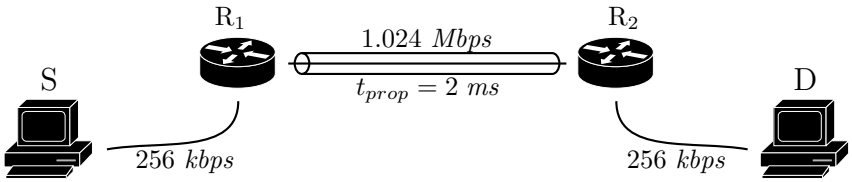
Se utiliza un mecanismo de control de congestión entre los nodos de acceso a la red (R_1 y R_2), por el que R_2 envía un paquete de confirmación (ack) para cada paquete de datos recibido. Los ack tienen un tamaño total de 375 bytes. Se puede configurar el tamaño de la ventana, ω, que se corresponde con el número máximo de paquetes que el transmisor (R_1) puede enviar sin haber recibido confirmación.

(a) Asumiendo que $\omega = 2$ paquetes, ¿cuánto tiempo tardaría S en enviar el fichero completo a D? ¿Cuál sería la cadencia de la fuente?

(b) ¿Qué valor de ω permitiría a la fuente transmitir de manera continua? ¿Cuánto tiempo tardaría en enviar el fichero en este caso?

(c) Utilizando el valor de ω calculado en el apartado anterior, se pide establecer el tiempo de procesado máximo que podría permitirse en R_1 y R_2 (sería el mismo) para poder seguir usando transmisión continua en la fuente. (*El tiempo de procesado de los ack se puede seguir considerando despreciable*).

Problema 38. Considerar la red de la figura.



Se transmiten paquetes de 384 *Bytes*, y se asume que el retardo de propagación en los enlaces de acceso es despreciable. Se utiliza un protocolo de control de flujo *stop & wait* entre R_1 y R_2 (configuración *semi-duplex*), de manera que R_1 no podrá enviar el siguiente paquete hasta haber recibido confirmación del anterior, para lo que se utilizan *ack* de 192 *Bytes*. Además, en R_2 se incurre en un tiempo de procesado de 7.5 *ms*.

(a) Calcular la cadencia máxima (en s^{-1}) a la que podría trabajar la fuente, y el tiempo necesario para transmitir M paquetes.

(b) ¿Cuál es el tiempo de procesado máximo que se podría tener en R_2 para alcanzar la cadencia máxima? ¿Cuál sería el tiempo necesario para enviar M paquetes en este caso?

Finalmente se observa que tiempo de procesado de R_2 es de 10 *ms*, por lo que se decide modificar la configuración del enlace entre R_1 y R_2, que pasa a ser *full-duplex*, reduciendo la velocidad del mismo a 384 *kbps*. Además, se modifica el algoritmo de control de flujo, aplicando un mecanismo de ventana deslizante, de manera que R_1 puede enviar ω paquetes consecutivos sin recibir confirmación, mientras que R_2 sigue enviando *ack* de 192 *Bytes* para cada paquete recibido.

(c) ¿Cuál es la cadencia a la que se podría enviar paquetes si $\omega = 2$? ¿Cuál sería el tiempo necesario para transmitir M paquetes?

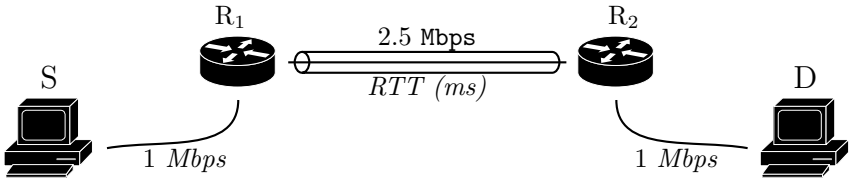
(d) ¿Cuál debería ser el valor de ω para poder utilizar la cadencia máxima posible en la fuente? ¿Cuál sería el tiempo necesario para enviar M paquetes? Comparar este tiempo con el calculado en el apartado (b).

Problema 39. Se utiliza un cuantificador uniforme de 2 bits en un conversor AD, para una señal que se sitúa entre -1 y 1 (V). Se recogen cuatro muestras de la señal analógica de entrada al cuantificador: $\mathbf{x} = \{-0.1,\ 0.3,\ -0.8,\ 0.6\}$

(a) Plantear una codificación de la señal digital que se transmitiría. ¿Cuáles serían los valores (analógicos) que se recibirían en el destino, $\widetilde{\mathbf{x}}$?

(b) Calcular la relación señal a ruido de cuantificación.
$\sigma_x^2 = \frac{1}{N}\sum_i (x[i] - \overline{x})^2$. $\sigma_n^2 = \frac{1}{N}\sum_i (x[i] - \widetilde{x}[i])^2$

Problema 40. A la hora de analizar el comportamiento de un algoritmo de control de congestión, se utiliza un simulador de redes, desplegando la topología que se muestra en la figura. El enlace entre R_1 y R_2 (*full-duplex*) se configura a partir de la capacidad y el *RTT (Round-Trip-Time)*, que se define como el tiempo de ida y vuelta, esto es, el doble del retardo de propagación del enlace.



El mecanismo de control de congestión que se emplea entre los nodos de acceso a la red (R_1 y R_2), se basa en el envío, por parte de R_2, de un paquete de confirmación (ack) por cada paquete de datos recibido. Los ack tienen un tamaño total de 500 Bytes. El algoritmo utilizado permite configurar el tamaño de la ventana, ω, que se corresponde con el número máximo de paquetes que el transmisor (R_1) puede enviar sin haber recibido confirmación. Además, la aplicación utilizada en la fuente durante los experimentos envía paquetes de 1250 Bytes, incluyendo una cabecera de 50 Bytes.

Se asume además que tanto el retardo de propagación en los enlaces de acceso, como el retardo de procesado en los nodos R_1 y R_2, pueden considerarse despreciables.

(a) Asumiendo que $\omega = 2$ paquetes, y que $RTT = 100$ *ms*, ¿cuánto tiempo tardaría S en enviar un fichero de 300 *kBytes* a D? ¿Cuál sería la cadencia de la fuente?
Se recuerda que 1 kByte son 2^{10} *Bytes*

(b) ¿Qué valor de ω permitiría a la fuente transmitir de manera continua para el valor anterior del RTT? ¿Cuánto tiempo tardaría en enviar el fichero en este caso?

(c) Si se utilizara una ventana $\omega = 7$, ¿cuál sería el valor máximo de RTT que permitiría utilizar transmisión continua?

E.T.S.I.I.T - Grado en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación

Redes de Comunicaciones

Curso 2023/2024

Tema 1 - Introducción
Soluciones de la hoja de problemas

Problema 1.

(a) 16.9 dB.

Problema 2.

(a) Circuitos: $S + DN + \frac{L}{B}$
Paquetes: $DN + \frac{P}{B}N + \frac{P}{B}\left(\frac{L}{P-H} - 1\right)$

(b) $P = \sqrt{\frac{LH}{N-1}} + H$

Problema 3.

(a) 9 `Bytes` (incluyendo cabecera: 6 + 3)

Problema 4.

(a) 31.25 paquetes/seg
(b) 27 paquetes/seg
(c) 27 paquetes/seg
(d) 33.3 paquetes/seg

Problema 5.

(a) Opción A: 15.8 segundos
Opción B: 13.92 segundos

(b) Reduciendo tiempo de establecimiento/liberación.

Problema 6.

(a) Datagrama: 1202 ms
Circuito virtual: 1390 ms

Problema 7.

(a) 800 ms
$R_b = 550$ kbps

(b) 822.5 ms
$R_b = 535$ kbps

Problema 8.

(a) 34.06 ms
(b) 265.8 ms

Problema 9.

(a) 980 `Bytes`
3 SDUs
(b) 131.28 ms
(c) 516.42 ms

Problema 10.

(a) 120 ms
(b) 70 + 50M (ms)
(c) 10.07 segundos
(d) 28.68 s (W = 1)
14.67 s (W = 4)

Problema 11.

(a) 200 ms
64 kbps (100 ms entre paquetes)
(b) 100(M+1) (ms)
(c) 10.1 segundos
(d) 25 s (W = 1)
13.75 s (W = 4)

Problema 12.

(a) 150 ms
64 kbps (50 ms entre paquetes)
(b) 125 ms
64 kbps (50 ms entre paquetes)
(c) 200 ms
49.23 kbps (65 ms entre paquetes)
(d) 380 ms
64 kbps (50 ms entre paquetes)

Problema 13.

(a) $P = \sqrt{\frac{8LH}{5+8B\alpha}} + H$
(b) 72.5 ms
(c) $\alpha < 0.05\ ms/bit$

Problema 14.

(a) 560 ms
(b) 67.2 s
(c) $(W = 4)$ 22.2 s
$(W = 8)$ 14.7 s
(d) 34.1 s
(e) W = 10
7.71 s

Problema 15.

(a) 6490 ms
(b) 7252 ms
(c) 332.8 kbps
(d) 8529 ms
(e) W = 2
6497 ms

Problema 16.

(a) 10.17 s
(b) $t_{\text{proc}} = 18.75$ ms
10.13 s
(c) 266.24 kbps

Problema 17.

(a) 20092 ms
(b) 20092 ms
(c) $t_{\text{proc}} = 35$ ms
(d) 113.55 kbps
(e) 2400 km
(f) 24896 ms

Problema 18.

(a) 4118 ms
(b) 1024 Bytes (ambos casos)

Problema 19.

(a) 4121.4 ms
1.95×10^{-3} ms
(b) $W = 2$

Problema 20.

(a) 10.318 s
(b) $\gamma_{\text{max}} = 6.25\ \frac{\mu s}{\text{bit}}$
(c) $W = 2$

Problema 21.

(a) $T_{5\ \text{pkt}} = 832\ ms$
7.8125 muestras por segundo
(b) 48 ms
(c) $\alpha, \beta \leq 23.4\ \frac{\mu s}{\text{bit}}$
$T_{5\ \text{pkt}} \approx 1.045\ s$

Problema 22.

(a) $T_{1\ \text{medida}} = 43.5\ ms$
5.75 Hz (medidas por segundo)
(b) $(k = 2)$ 8.77 Hz
$(k = 4)$ 11.9 Hz

Problema 23.

(a) $\text{T}_{\text{fichero}} = 196.64$ s
(b)
(c) W = 16 paquetes

Problema 24.

(a) 400 `kbps`
(b)

Problema 25.

(a) 22 ms
62.5 s^{-1}
(b) 15.25 ms
333.3 s^{-1}
(c) 11 ms

Problema 26.

(a) $\text{T}_{\text{fichero}} = 2797$ ms
(b) $W = 8$
$\text{T}_{\text{fichero}} = 409$ ms

Problema 27.

(a) $T_{\text{fichero}} = 124$ ms
(b) $T_{\text{fichero}} = 169$ ms
$\chi_{\max} = 4.5$ ms
(c) $\omega = 7$ pkt
No

Problema 28.

(a) $T_{\text{fichero}} = 367$ ms
$R_b = 1.02$ Mbps
(b) $T_{\text{fichero}} = 253$ ms
$\omega_{\min} = 5$ pkt

Problema 29.

(a) 19.82 dB
(b)

Problema 30.

(a) 713.1 ms
(b) $\omega = 3$, 488.9 ms

Problema 31.

(a) $P^\star = \sqrt{\frac{L \cdot H}{N(1+\alpha \cdot B)}} + H$
(b) 38.25 s, 39.015 s

Problema 32.

(a) 50 s^{-1}, 60 %, 9.588 s, No es posible
(b) $\delta = 4$: 50 s^{-1}, 9.588 s
$\delta = 2$: 62.5 s^{-1}, 7.684 s
(c) $\omega_{\delta=4} = 11$, $\omega_{\delta=2} = 9$, 3.876 s

Problema 33.

(a) 6.8 dB
(b)

Problema 34.

(a) 1.6 s, 300 km, 808 ms
(b) 912 ms, $\omega = 3$, 813 ms

Problema 35.

(a) 20.04 s
(b) 9.853 s
(c) $\omega = 10$, 3.913 ms

Problema 36.

(a) 6N + 46 ms
(b) 55.56 s^{-1}, 1500 km, No
(c) 16M+44 (ms), 18M + 46 (ms)

Problema 37.

(a) 19.2 s, 13.33 s^{-1}
(b) $\omega = 8$, 5.22 s
(c) 10 ms

Problema 38.

(a) 62.5 s^{-1}, 20.5 + 16M (ms)
(b) $T_{\text{proc}} = 3.5$ ms, 20.5 + 12M (ms)
(c) 76.923 s^{-1}, 30 + 13M (ms)
(d) $\omega = 3$, 32 + 13M (ms)

Problema 39.

(a)
(b) 13.424 dB

Problema 40.

(a) 13.5 s, 18.93 s^{-1}
(b) $\omega = 11$, 2.62 s
(c) 64.4 ms