[illegible]

$$\begin{array}{r}
 010000 \\
 11011 \\
 \hline
 010110 \\
 11011 \\
 \hline
 011010 \\
 11011 \\
 \hline
 000010 \\
 00000 \\
 \hline
 0010
 \end{array}$$

El resto obtenido (0010) es el CRC. Para componer el mensaje a enviar sólo hay que concatenarlo al mensaje original, por lo que el mensaje a transmitir es  $T=11101010110010$

5. Suponga que quiere transmitir los datos 100111001 y que se usa  $x^6+x^3+1$  como polinomio generador. ¿Qué secuencia de bits se enviará?

### Parada y espera

6. Dos estaciones se comunican mediante un protocolo de *parada-y-espera* sobre un enlace de 128 Kbps. Se utilizan tramas de datos de 1.000 bits (incluyendo cabeceras y campos de control) y tramas de confirmación de 100 bits. Determine la distancia máxima entre las estaciones para que la comunicación presente una eficiencia superior al 80%. ¿Cuál es el tamaño óptimo del temporizador de retransmisión?

La eficiencia de un protocolo de parada y espera, despreciando los tiempos de procesamiento y la longitud de las tramas de confirmación, viene determinada por la relación entre el tiempo

$$U = \frac{1-P}{1+2a} \quad \text{con} \quad a = \frac{t_{prop}}{t_{trama}}$$

de propagación y el tiempo de emisión de una trama, de acuerdo a la expresión:

Sin embargo, se indica que el tamaño de las tramas de control es de 100 bits, que representa el 10% del tamaño de una trama de datos. Por tanto, una de las aproximaciones indicadas no es aplicable y habremos de evaluar la eficiencia teniendo en cuenta la longitud de las tramas de confirmación. En este caso, en ausencia de errores, la eficiencia vendrá dada por

Por tanto, en función de  $a$ , tendremos

$$U = \frac{1}{1 + 2 \frac{t_{prop}}{t_{trama}} + \frac{t_{ack}}{t_{trama}}}$$

Dado que el retardo a través de la línea es únicamente debido a los medios físicos, el tiempo de propagación será el asociado a la propagación de la señal sobre el medio, que será inversamente proporcional a la velocidad de la luz en un medio guiado ( $2 \cdot 10^8$  m/s), por lo que, a partir de los valores indicados en el enunciado, tendremos:

$$\begin{aligned}
 t_{trama} &= \frac{L_{trama}}{v_{trans}} = \frac{1000 \text{ bits}}{128 \cdot 10^3 \text{ bps}} = 7,8 \text{ ms} \\
 t_{prop} &= \frac{d}{v_{prop}} = \frac{d}{2 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 5 \cdot 10^{-6} d \text{ ms} \\
 \frac{t_{ack}}{t_{trama}} &= \frac{100 \text{ bits}}{1000 \text{ bits}} = 0,1
 \end{aligned}$$

Dado que se requiere una eficiencia superior al 80%,  $U > 0,8$ . Sustituyendo en la expresión de la eficiencia, el valor límite vendrá dado por

$$U = \frac{1}{1 + 5 \cdot 10^{-6}d/7,8 + 0,1} > 0,8 \Rightarrow \frac{1}{1,1 + 6,4 \cdot 10^{-7}d} > 0,8$$

$$6,4 \cdot 10^{-7}d < 0,15 \Rightarrow d < 234 \text{ km}$$

El valor mínimo del temporizador será aquel que evite las retransmisiones innecesarias de una trama debido a que no haya sido posible la recepción de la confirmación a la misma. Es decir, el valor mínimo del temporizador será el correspondiente al tiempo empleado desde que se inicia la transmisión de una trama hasta que se recibe la confirmación de la misma:

$$t_{temp} > t_{trama} + 2t_{prop} + \square\square\square$$

donde hemos despreciado los tiempos de procesamiento.

En las condiciones correspondientes al valor mínimo del apartado anterior,

$$\begin{aligned} t_{trama} &= \frac{L_{trama}}{v_{trans}} = \frac{1000 \text{ bits}}{128 \cdot 10^3 \text{ bps}} = 7,8 \text{ ms} \\ \square\square\square\square &= \frac{\square}{\square\square\square\square} = \frac{86,7 \cdot 10^3 \square}{2 \cdot 10^8 \square / \square} = 0,43 \square\square \\ \square\square\square &= \frac{L_{ack}}{v_{trans}} = \frac{100 \text{ bits}}{128 \cdot 10^3 \text{ bps}} = 0,78 \square\square \end{aligned}$$

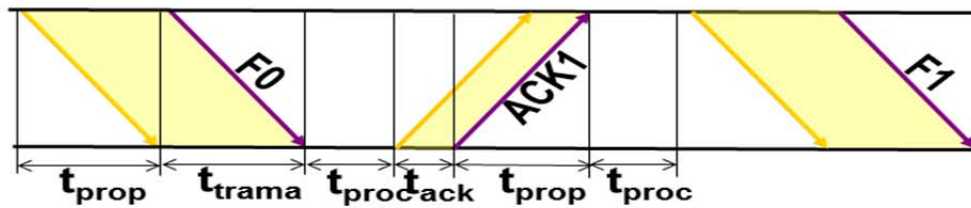
Por tanto,

$$t_{temp} > 9,44 \text{ ms}$$

Por otra parte, el temporizador debe ser lo menor posible a fin de que, en caso de de expirar y sea necesaria la retransmisión, éste se realice lo antes posible. Por tanto, el valor óptimo del temporizador es el mínimo anteriormente calculado.

$$t_{temp, \text{óptimo}} = 9,44 \text{ ms}$$

7. Un sistema ARQ de parada y espera tiene un valor del temporizador inferior al tiempo requerido para recibir una confirmación. Realice un esquema de la secuencia de intercambios de tramas entre las dos estaciones cuando la estación A envía 5 tramas a la estación B y no aparecen errores durante la transmisión.
8. Se lleva a cabo la transferencia de un fichero de longitud  $M$  bits entre dos estaciones finales, distanciadas entre sí  $D$  metros en una red con topología en bus. Si la velocidad de transmisión es  $B$  bps, la transferencia se realiza en tramas de  $P$  bits,  $h$  de los cuales son suplementarios, y cada trama se confirma siguiendo el esquema *parada y espera* mediante una especial de confirmación de longitud  $C$  bits:
  - a) Estime el tiempo consumido en la transferencia del mensaje completo.
  - b) ¿Cuál será la eficiencia del proceso si no se producen errores en el canal? ¿Y si la probabilidad fuese tal que hubiera que transmitir cada trama un promedio de  $N$  veces?
- a) En el protocolo de parada y espera cada trama es enviada y confirmada individualmente, no procediéndose al envío de la trama siguiente hasta que la anterior ha sido confirmada. Por tanto, la evolución temporal asociada a la transmisión de la trama F0 será la mostrada en la figura.



Como se puede apreciar, el tiempo desde el inicio del envío de la trama F0 hasta que se puede proceder al envío de la trama siguiente (F1) queda determinado por las siguientes componentes:

- $t_{prop}$ : tiempo de propagación emisor-receptor (y viceversa)
- $t_{trama}$ : tiempo empleado en la transmisión de la trama
- $t_{proc}$ : tiempo de procesamiento en el emisor y en el receptor (supuestos iguales)
- $t_{ack}$ : tiempo empleado en la transmisión de la confirmación

Por tanto,

$$t_{total} = t_{prop} + t_{trama} + t_{proc} + t_{ack} + t_{prop} + t_{proc}$$

Suponiendo que los tiempos de procesamiento son despreciables y sustituyendo los valores de los diferentes elementos, el tiempo empleado en el envío de cada trama será

$$t_{total} = 2 \frac{D \text{ m}}{2 \cdot 10^8 \text{ m/s}} + \frac{P \text{ bits}}{B \text{ bps}} + \frac{C \text{ bits}}{B \text{ bps}}$$

donde hemos tenido en cuenta que la velocidad de propagación de la luz en un medio guiado es, aproximadamente,  $2 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ .

Dado que el mensaje es de  $M$  bits y se transmiten  $P-h$  bits de datos por trama, el número de tramas necesarias vendrá dado por

$$n = \left\lceil \frac{M}{P-h} \right\rceil \text{ tramas/mensaje}$$

Finalmente, el tiempo empleado en transmitir todo el mensaje será

$$t_{mensaje} = n \cdot t_{total} = \left\lceil \frac{M}{P-h} \right\rceil \left( \frac{D}{10^8} + \frac{P+C}{B} \right) \text{ s.}$$

- b) La eficiencia vendrá determinada por el tiempo empleado en la transmisión de bits del mensaje frente al tiempo total necesario. En el caso de que cada trama sólo se transmita una vez, el tiempo útil empleado en la transmisión de bits de datos vendrá determinado por la cantidad de bits útiles en cada trama frente al tiempo empleado en su envío y confirmación. Si se considera todo el mensaje, tendremos

$$U = \frac{\left\lceil \frac{M}{P-h} \right\rceil \text{ tramas} \cdot \frac{(P-H) \text{ bits útiles/trama}}{B \text{ bps}}}{\left\lceil \frac{M}{P-h} \right\rceil \left( \frac{D}{10^8} + \frac{P+C}{B} \right) \text{ s}}$$

Simplificando

$$U = \frac{(P-H)}{\left( \frac{D \cdot B}{10^8} + P + C \right)}$$

Si cada trama debe ser transmitida un promedio de  $N$  veces, el tiempo total empleado en transferir los  $P-H$  bits útiles de cada trama se multiplicará por  $N$ , por lo que

$$U = \frac{\left\lceil \frac{M}{P-h} \right\rceil \text{ tramas} \cdot \frac{(P-H) \text{ bits útiles/trama}}{B \text{ bps}}}{N \left\lceil \frac{M}{P-h} \right\rceil \left( \frac{D}{10^8} + \frac{P+C}{B} \right) \text{ s}} \Rightarrow U = \frac{(P-H)}{N \left( \frac{D \cdot B}{10^8} + P + C \right)}$$



## Ventana deslizante

9. Un canal tiene una tasa de bits de 10 kbps y un retardo de propagación de 30 ms.
- ¿Para qué intervalo de tamaños de trama proporciona el protocolo de parada y espera una eficiencia de, al menos, el 50%?
  - ¿Cuál debe ser el tamaño mínimo de la ventana de envío para que el protocolo de ventana deslizante proporcione una eficiencia del 100%?
  - La eficiencia de un protocolo de parada y espera se puede expresar mediante

$$U = \frac{1}{1+2a} \quad \text{siendo} \quad a = \frac{t_{prop}}{t_{trama}}$$

Para evaluar la eficiencia es preciso calcular el tiempo de trama, que puede expresarse en función de la longitud de la trama, L, y de la velocidad de transmisión, R, como sigue:

$$t_{trama} = \frac{L}{R} \Rightarrow t_{trama} = \frac{L}{10000 \text{ bps}}$$

Por tanto, sustituyendo el tiempo de propagación y el tiempo de trama en la expresión de la eficiencia, y teniendo en cuenta que se nos pide el tamaño para que  $U > 0,5$ , resulta

$$a = \frac{t_{prop}}{t_{trama}} = \frac{30 \cdot 10^{-3} \text{ s}}{\frac{L}{10000 \text{ bps}}} = \frac{300}{L} \Rightarrow U = \frac{1}{1+2\frac{300}{L}} > 0,5$$

Operando,

$$2 > 1 + 2\frac{300}{L} \Rightarrow L > 300 \text{ bits}$$

- d) La eficiencia del protocolo de ventana deslizante es (se supone una situación sin errores)

$$U = \begin{cases} 1 & \text{si } N \geq 1+2a \\ \frac{N}{1+2a} & \text{si } N < 1+2a \end{cases}$$

donde N es el tamaño de la ventana.

Por tanto, para conseguir una eficiencia del 100% se deberá cumplir que  $N \geq 1+2a$ . En

$$N \geq 1+2a = 1+2\frac{t_{prop}}{t_{trama}} \Rightarrow N \geq 1+\frac{30 \cdot 10^{-3} \text{ s}}{\frac{L}{10000 \text{ bps}}} \Rightarrow N \geq 1+\frac{300}{L}$$

consecuencia,

El tamaño de la ventana de envío óptima depende, como podemos comprobar, de la longitud de trama utilizada.

10. Considere un par de estaciones conectadas mediante un enlace radio punto a punto a 10 Mbps. Las estaciones están separadas una distancia de 10000 km e intercambian tramas de 100 bits. Se utiliza un protocolo de ventana deslizante adelante atrás N con campo de numeración de trama de 2 bits. Muestre el diagrama temporal correspondiente al intercambio de 5 tramas de datos desde uno de los equipos.

11. Considere un canal de satélite de 64 kbps libre de errores que se usa para enviar tramas de datos de 512 bytes en una dirección y devolver acuses de recibo muy cortos en la otra. ¿Cuál es el rendimiento máximo con tamaños de ventana de 1, 7, 15 y 127?
12. Un canal tiene una razón de datos de  $R$  bps y un retardo de propagación de  $t$  segundos por kilómetro. La distancia entre el nodo emisor y el receptor es de  $L$  kilómetros. Los nodos intercambian tramas de longitud fija igual a  $B$  bits. Encontrar la expresión que dé el tamaño del campo de numeración de secuencia mínimo en función de  $R$ ,  $t$ ,  $B$  y  $L$  (considerando utilización máxima). Suponer que las tramas de confirmación tienen un tamaño despreciable y el procesamiento en los nodos es instantáneo.

En el caso indicado en el enunciado (tramas de confirmación de tamaño despreciable, sin errores y con tiempo de procesamiento nulo), la eficiencia de un protocolo de ventana deslizante es

$$U = \begin{cases} 1 & \text{si } N \geq 1 + 2a \\ \frac{N}{1 + 2a} & \text{si } N < 1 + 2a \end{cases}$$

donde  $N$  es el tamaño de la ventana y  $a$  el cociente

$$a = \frac{t_{prop}}{t_{trama}}$$

Por tanto, la eficiencia será máxima e igual a 1 siempre que se cumpla

$$N \geq 1 + 2a \quad (1)$$

Los tiempos de trama y de propagación, de acuerdo al enunciado, serán

$$\left. \begin{aligned} t_{prop} &= L_{km} \cdot T_{s/km} = LT_s \\ t_{trama} &= \frac{B_{bits/trama}}{R_{bps}} = \frac{B}{R}_s \end{aligned} \right\} \Rightarrow a = \frac{LT}{B/R} = \frac{RLT}{B}$$

Sustituyendo en (1), obtenemos

$$N \geq 1 + 2 \frac{RLT}{B} \quad (2)$$

Finalmente, sabiendo que la numeración de las tramas en un protocolo de ventana deslizante es módulo  $2^n$  (numeradas de 0 a  $2^n - 1$ ), siendo  $n$  el número de bits del protocolo, tendremos:

$$N_{max} = 2^n \rightarrow n_{min} = \log_2 \left( 1 + 2 \frac{RLT}{B} \right)$$

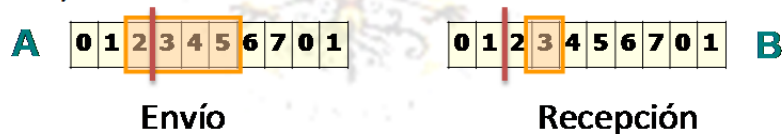
13. Dos nodos vecinos (A y B) usan un protocolo con ventana deslizante con 3 bits para los números de secuencia. Se utiliza como procedimiento ARQ un adelante atrás N con un tamaño de ventana igual a 4. Supóngase que A transmite y B recibe. Mostrar las distintas posiciones de las ventanas para la siguiente sucesión de eventos:
- Antes de que A envíe ninguna trama.
  - Después de que A envíe las tramas 0, 1, 2 y B confirme 0 y 1 y las confirmaciones se hayan recibido en A.

- c) Después de que A envíe las tramas 3, 4 y 5 y B confirma la 4 y la confirmación 4 se recibe en A.

- a) Dado que se usan 3 bits para la numeración de secuencia, las tramas serán numeradas de 0 a  $2^3-1=7$ . Por otra parte, si se usa ARQ adelante atrás N, el tamaño de la ventana de recepción será  $N_r=1$ . Por tanto, el estado inicial de las ventanas será:



- b) Si se han enviado las tramas 0, 1 y 2, el puntero se habrá ido desplazando hasta quedar tras la posición 2. Dado que se han recibido las confirmaciones de la 0 y la 1, el extremo inferior de la ventana de envío se habrá ido desplazando. En el receptor, y suponiendo que la trama 2 ha sido recibida, se estará a la espera de la 3, que será la única en la ventana de recepción. El puntero de confirmaciones se habrá desplazado con el envío de las confirmaciones 0 y 1. Por tanto, el estado de las ventanas será



Nótese que, dado que las acciones en el emisor y receptor no son simultáneas, y de acuerdo al escenario planteado, podría darse el caso de que la trama 2 se encuentre aún en tránsito. Evidentemente, las tramas 0 y 1 deben haberse recibido, ya que en caso contrario no podrían haberse enviado.

- c) De forma análoga al apartado anterior, el envío de 3, 4 y 5 hace que se desplace el puntero de envío. Hemos de notar que estas tramas se encuentran en la ventana de envío, pudiendo ser enviadas incondicionalmente, independientemente de la evolución del sistema. La recepción de la confirmación de la trama 4 implica la confirmación de todas las anteriores, por lo que el extremo inferior de la ventana se habrá desplazado hasta excluir dicha trama 4. En cuanto a la ventana de recepción, se estará a la espera de la 6, suponiendo que la trama 5 ya ha sido recibida, mientras que el puntero de confirmaciones estará tras la 4. Por tanto, el estado de las ventanas será



14. Se usa un protocolo simple de parada y espera para la transferencia de ficheros mediante el envío de bloques individuales de 2000 bits de datos (incluyendo los bits de control). Suponiendo que ambos usuarios se comunican con enlaces dúplex a 128 kbps y que el retardo a través de la línea es únicamente debido a los medios físicos, se pide:

- Calcule la máxima distancia de separación entre los dos usuarios para conseguir una eficiencia en el protocolo, sin errores, de al menos un 95%.
- Calcule el valor del temporizador de retransmisión de tramas que garantice la máxima eficiencia en las condiciones del apartado anterior.
- Suponga que la distancia entre los usuarios es de 1000 km. Determine la eficiencia del protocolo de parada y espera y proponga otro mecanismo de control de flujo con eficiencia del 100%, calculando sus parámetros más significativos.

- a) La eficiencia de un protocolo de parada y espera, despreciando los tiempos de procesamiento y la longitud de las tramas de confirmación, viene determinada por la relación entre el tiempo de propagación y el tiempo de emisión de una trama, de acuerdo a la expresión:

$$U = \frac{1 - P}{1 + 2a}$$

siendo

$$a = \frac{t_{prop}}{t_{trama}}$$

Dado que el retardo a través de la línea es únicamente debido a los medios físicos, el tiempo de propagación será el asociado a la propagación de la señal sobre el medio, que será inversamente proporcional a la velocidad de la luz en un medio guiado ( $2 \cdot 10^8$  m/s),

$$a = \frac{\frac{d}{v_{prop}}}{\frac{L_{trama}}{v_{trans}}} = \frac{\frac{d}{2 \cdot 10^8 \text{ m/s}}}{\frac{2000 \text{ bits}}{128 \cdot 10^3 \text{ bps}}}$$

por lo que, a partir de los valores indicados en el enunciado, tendremos:

Si consideramos que no existen errores,  $P=0$ , la eficiencia resulta,

Para que la eficiencia sea superior al 95%,  $U > 0,95$ , por lo que

- b) El valor mínimo del temporizador será aquel que evite las retransmisiones innecesarias de una trama debido a que no haya sido posible la recepción de la confirmación a la misma.

$$U = \frac{1}{1 + 2 \frac{\frac{d}{2 \cdot 10^8 \text{ m/s}}}{\frac{2000 \text{ bits}}{128 \cdot 10^3 \text{ bps}}}}$$

$$0,95 > \frac{1}{1 + 2 \frac{\frac{d}{2 \cdot 10^8 \text{ m/s}}}{\frac{2000 \text{ bits}}{128 \cdot 10^3 \text{ bps}}}} \Rightarrow d < 82,236 \text{ km}$$

Es decir, el valor mínimo del temporizador será el correspondiente al tiempo empleado desde que se inicia la transmisión de una trama hasta que se recibe la confirmación de la misma:

$$t_{temp} > t_{trama} + 2t_{prop}$$

donde hemos despreciado los tiempos de procesamiento y la longitud de la trama de confirmación.

En las condiciones correspondientes al valor mínimo del apartado anterior,

$$t_{trama} = \frac{L_{trama}}{v_{trans}} = \frac{2000 \text{ bits}}{128 \cdot 10^3 \text{ bps}} = 15,6 \text{ ms}$$

$$t_{prop} = \frac{d}{v_{prop}} = \frac{82,236 \cdot 10^3 \text{ m}}{2 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 0,41 \text{ ms}$$

Por tanto,

$$t_{temp} > 16,42 \text{ ms}$$



- c) Si la distancia entre estaciones fuese de 1000 km, se tendría:  
Si más que aplicar la expresión para la eficiencia utilizada en el apartado a) con  $d=1000$  km, obtenemos

$$U = \frac{1}{1 + 2 \frac{d/2 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2000 \text{ bits} / 128 \cdot 10^3 \text{ bps}}} \Rightarrow U = 0,61 \text{ (61\%)}$$

La eficiencia obtenida resulta baja debido a que el retardo de propagación es elevado en comparación con el tiempo de trama. Es posible mejorar el rendimiento sin más que utilizar un protocolo de ventana deslizante con un tamaño suficiente de la ventana de envío. Sabemos que la eficiencia de los protocolos de ventana deslizante en ausencia de errores es:

$$U = \begin{cases} \frac{1}{N} & \text{si } N \geq 1 + 2a \\ \frac{N}{1 + 2a} & \text{si } N < 1 + 2a \end{cases}$$

Así, en ausencia de errores, podríamos conseguir una eficiencia del 100% sin más que utilizar una ventana de envío tal que

$$N \geq 1 + 2a = 1 + 2 \frac{t_{prop}}{t_{trama}}$$

Por tanto, teniendo en cuenta que

$$t_{trama} = \frac{L_{trama}}{v_{trans}} = \frac{2000 \text{ bits}}{128 \cdot 10^3 \text{ bps}} = 15,6 \text{ ms}$$

$$t_{prop} = \frac{d}{v_{prop}} = \frac{1000 \cdot 10^3 \text{ m}}{2 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 5 \text{ ms}$$

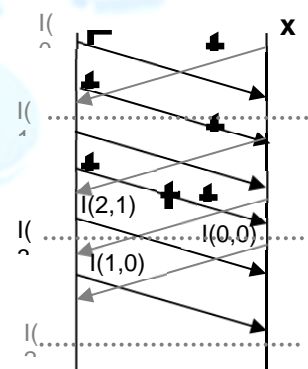
Resulta,

$$N \geq 1 + 2 \cdot \frac{5}{15,6} = 1,64 \Rightarrow N \geq 2$$

15. Suponga que se usa un ARQ con rechazo selectivo donde  $N=4$ . Muéstrese mediante un ejemplo que se necesitará una secuencia de numeración de 3 bits.

16. Dos entidades de nivel de enlace intercambian tramas mediante un procedimiento de ventana deslizante con recuperación de errores mediante adelante-atrás N. Se utilizan 3 bits para numerar secuencias y la ventana de envío tiene tamaño 5. Ambas entidades disponen de datos suficientes en espera de ser enviados, habiéndose producido el intercambio de tramas mostrado en la figura. Se pide:

- a) Indique el estado de todas las ventanas en los puntos indicados  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  en el diagrama.  
b) ¿Cómo se recupera el error en la trama 3? Suponga que no se usan tramas de rechazo. Esquematice la evolución posterior hasta la recuperación del error utilizando un diagrama análogo al mostrado.

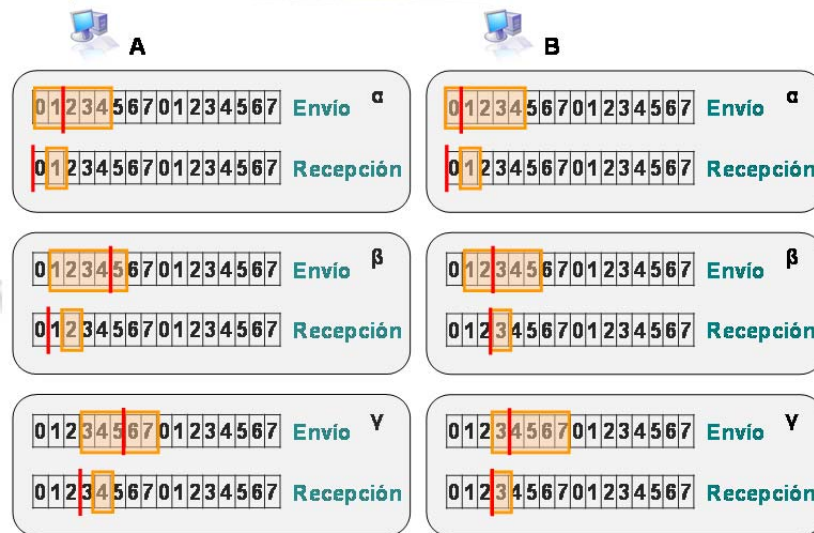


- a) Dado que la comunicación es bidireccional, cada entidad dispondrá de una ventana de envío y otra de recepción. El número de ventanas a mostrar en cada punto es, por tanto,

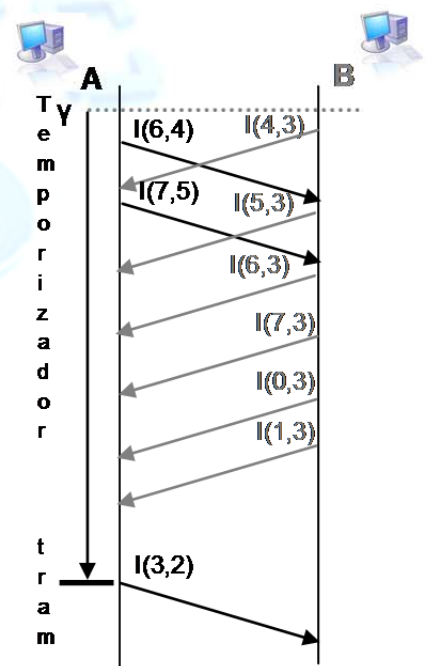
4. Al ser un procedimiento adelante-atrás N, el tamaño de la ventana de recepción es 1. Las situaciones en cada instante son:

- Punto  $\alpha$ : A ha enviado las tramas 0 y 1 y no ha recibido ninguna confirmación. No ha enviado confirmaciones, aunque ha recibido correctamente la trama 0. Por otra parte, B ha enviado la trama 0, sin recibir ninguna confirmación, y ha recibido correctamente la trama 0 sin confirmarla aún.
- Punto  $\beta$ : A ha enviado las tramas 2, 3 y 4 y recibido confirmación de la 0. Ha enviado confirmaciones hasta la trama 1 y ha recibido correctamente la trama 1. B ha enviado las tramas 1 y 2 y recibido confirmación de la 0. Ha recibido incorrectamente la trama 3, por lo que no avanza la ventana de recepción.
- Punto  $\gamma$ : A ha enviado la trama 5, habiendo recibido confirmación hasta la trama 2. Ha recibido la trama 3 y confirmado hasta la trama 2. B ha enviado la trama 3, recibido confirmación de la 2 y continúa esperando la trama 3.

Las gráficas son, por tanto,

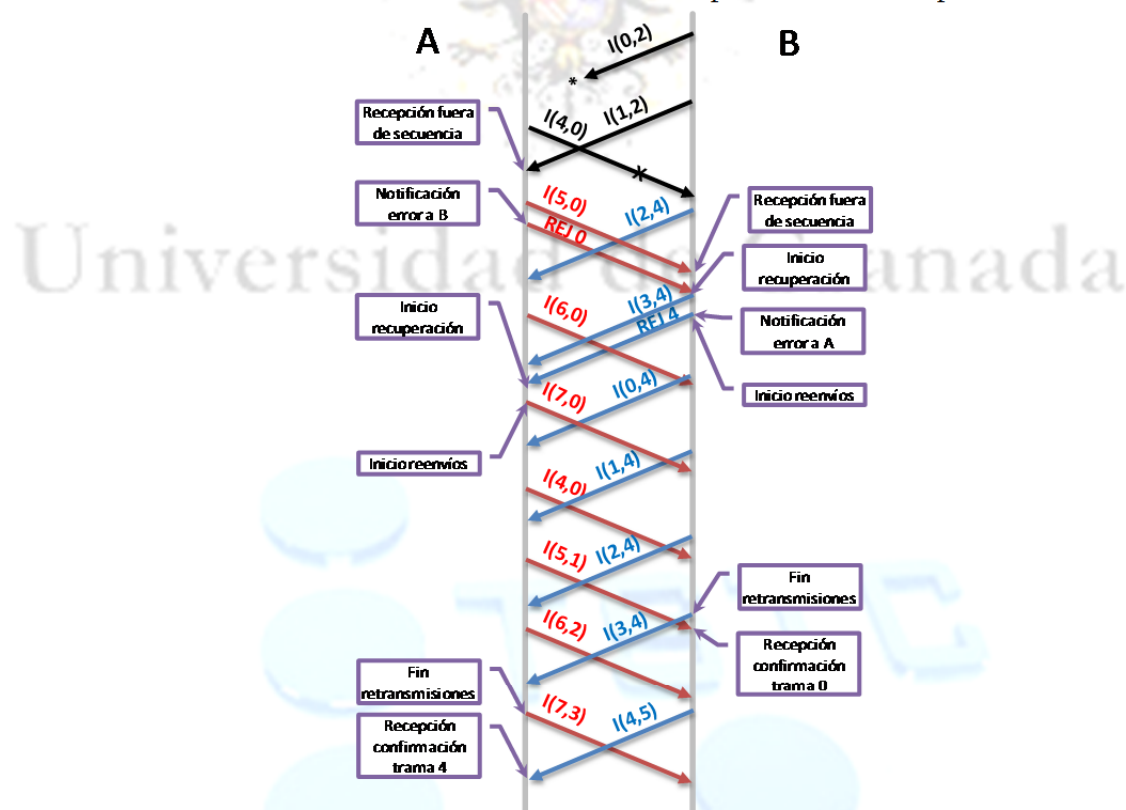


- b) Dado que no se utilizan tramas de rechazo, la recuperación del error pasa, necesariamente, por el uso de los temporizadores. Tras enviar la trama 3 se activa el temporizador correspondiente (al igual que para todas las restantes tramas), que acabará expirando al no recibirse la confirmación de la misma. La evolución posterior hará que A envíe todas las tramas posibles, hasta agotar la ventana de envío, mientras que B hará lo mismo (suponemos que no se recibirán confirmaciones una vez que A agote la ventana de envío), siempre que se suponga que el temporizador es suficientemente grande. Existen algunas variantes posibles, dependiendo de si se considera que la duración del temporizador es inferior (se cortará antes la secuencia indicada en el diagrama) o que A puede enviar tramas de confirmación (tramas de supervisión). Asimismo, si se considera el uso de tramas RR, la recuperación podría realizarse mediante el envío, por parte de A, de una trama RR con el bit de poll activo y las consiguientes acciones posteriores (no considerado en el diagrama).



17. Dos entidades de nivel de enlace intercambian tramas utilizando un protocolo de ventana deslizante de 3 bits. Ambas entidades disponen de datos en sus respectivas colas en espera de ser transmitidos. Realizado el intercambio mostrado en la figura adjunta, represente y comente la evolución posterior y los procedimientos de recuperación si se usan confirmaciones negativas siguiendo el procedimiento *adelante-atrás N*.

- a) Si se usan confirmaciones negativas según adelante atrás N, se podrán enviar tramas de rechazo (REJ) una vez se determine la existencia de un error. Por tanto, en este caso, A podrá enviar una trama REJ tras recibir la trama I(1,2) de B, ya que se encontrará fuera de secuencia (no se ha recibido una trama 0 previamente). En el caso de B, este habrá de esperar a la recepción de otra trama correcta para poder enviar la trama de rechazo, ya que no se puede tener certeza respecto del número de trama recibida con errores (el error podría estar en el número de trama). Por tanto, y dado que, de acuerdo al enunciado, tanto A como B continuarían emitiendo tramas, una posible evolución posterior sería



donde hemos considerado que, una vez se inicia la transmisión de una trama, no se puede interrumpir su envío. Asimismo, tras la constatación del error, habrá que retransmitir todas las tramas que se hubiesen enviado tras la errónea, incluida la errónea (ARQ adelante atrás N).

18. Una entidad de enlace debe enviar un mensaje de 1 KB a otra entidad de enlace destino. Se supone un tamaño máximo de trama de 2.560 bits, 48 de los cuales son de redundancia, una longitud del enlace (cableado) de 20 km y una velocidad de transmisión de 256 kbps. Lleve a cabo un diagrama del intercambio de tramas que tiene lugar si se produce un error en la segunda trama enviada y se utiliza ARQ *adelante-atrás N*. Muestre el estado de las ventanas en



el emisor y en el receptor tras el envío de la trama errónea, tras su retransmisión y tras el envío de la última trama.

19. Dos usuarios de RDSI han decidido implementar un protocolo simple de parada y espera para la transferencia de ficheros. Con este protocolo se aseguran la llegada al destino de bloques individuales de 1000 bits de datos (incluyendo los bits de control). Suponiendo que ambos usuarios comunican con tarjetas RDSI a 128 kbps y que el retardo a través de la línea es únicamente debido a los medios físicos, se pide:
- Calcule la máxima distancia de separación entre los dos usuarios para conseguir una eficiencia en el protocolo, sin errores, de al menos un 90%.
  - Calcule el valor del temporizador de retransmisión de tramas más adecuado en las condiciones del apartado anterior.
  - Suponiendo que se producen errores en la transmisión, determine qué campos del formato de las tramas y/o variables de estado (y/o mecanismos adicionales) serían necesarios para evitar los duplicados de tramas de información por la pérdida de confirmaciones.
  - Si la distancia entre los usuarios fuera de 1000 km:
    - Determine la eficiencia del protocolo de parada y espera.
    - Proponga otro mecanismo de control de flujo con eficiencia del 100%, calculando sus parámetros más significativos.
  - Suponiendo que se decide implantar un protocolo de ventana deslizante con repetición selectiva (3 bits para numeración de secuencia), ¿se podrían mandar consecutivamente dos tramas de rechazo selectivo: SREJ0, SREJ1? Razone su respuesta.
  - La eficiencia de un protocolo de parada y espera, despreciando los tiempos de procesamiento y la longitud de las tramas de confirmación, viene determinada por la relación entre el tiempo de propagación y el tiempo de emisión de una trama, de acuerdo a la expresión:

$$U = \frac{1 - P}{1 + 2a}$$

siendo

$$a = \frac{t_{prop}}{t_{trama}}$$

Dado que el retardo a través de la línea es únicamente debido a los medios físicos, el tiempo de propagación será el asociado a la propagación de la señal sobre el medio, que será inversamente proporcional a la velocidad de la luz en un medio guiado ( $2 \cdot 10^8$  m/s),

$$a = \frac{d/v_{prop}}{L_{trama}/v_{transm}} = \frac{d/2 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1000 \text{ bits}/128 \cdot 10^3 \text{ bps}}$$

por lo que, a partir de los valores indicados en el enunciado, tendremos:

Si consideramos que no existen errores,  $P=0$ , la eficiencia resulta,

Para que la eficiencia sea superior al 90%,  $U > 0,9$ , por lo que

- El valor mínimo del temporizador será aquel que evite las retransmisiones innecesarias de una trama debido a que no haya sido posible la recepción de la confirmación a la misma.



$$0,9 > \frac{1}{1 + 2 \frac{d / 2 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1000 \text{ bits} / 128 \cdot 10^3 \text{ bps}}} \Rightarrow d < 86,7 \text{ km}$$

Es decir, el valor mínimo del temporizador será el correspondiente al tiempo empleado desde que se inicia la transmisión de una trama hasta que se recibe la confirmación de la misma:

$$t_{temp} > t_{trama} + 2t_{prop}$$

donde hemos despreciado los tiempos de procesamiento y la longitud de la trama de confirmación.

En las condiciones correspondientes al valor mínimo del apartado anterior,

$$t_{trama} = \frac{L_{trama}}{v_{trans}} = \frac{1000 \text{ bits}}{128 \cdot 10^3 \text{ bps}} = 7,8 \text{ ms}$$

$$t_{prop} = \frac{d}{v_{prop}} = \frac{86,7 \cdot 10^3 \text{ m}}{2 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 0,43 \text{ ms}$$

Por tanto,

$$t_{temp} > 8,66 \text{ ms}$$

- c) Para evitar los errores asociados a la posible aparición de duplicidades debidas a la pérdida de confirmaciones bastará con incorporar algún mecanismo que permita determinar al receptor si la trama recibida es una retransmisión de la trama anterior o es una nueva trama. A este fin, dado que se usa parada y espera, bastará con etiquetar de forma alternativa las nuevas tramas que se envíen con dos etiquetas diferentes. La forma más simple de hacerlo es incorporar una numeración de secuencia de 1 bit, es decir, etiquetar las tramas a enviar con 0 o 1 alternativamente. De esta forma, si el receptor recibe dos tramas consecutivas con la misma etiqueta resulta evidente que se ha producido una retransmisión. Obviamente, la existencia de etiquetas en las tramas requiere que también se incluyan en las confirmaciones, por lo que será necesario incorporar el campo de numeración en las tramas de confirmación.
- d) Si la distancia entre estaciones fuese de 1000 km, se tendría:  
Si más que aplicar la expresión para la eficiencia utilizada en el apartado a) con  $d=1000$  km, obtenemos

$$U = \frac{1}{1 + 2 \frac{d / 2 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1000 \text{ bits} / 128 \cdot 10^3 \text{ bps}}} \Rightarrow U = 0.43 \text{ (43\%)}$$

La eficiencia obtenida resulta baja debido a que el retardo de propagación es elevado en comparación con el tiempo de trama. Es posible mejorar el rendimiento sin más que utilizar un protocolo de ventana deslizante con un tamaño suficiente de la ventana de envío. Sabemos que la eficiencia de los protocolos de ventana deslizante en ausencia de errores es:

$$U = \begin{cases} 1 & \text{si } N \geq 1 + 2a \\ \frac{N}{1 + 2a} & \text{si } N < 1 + 2a \end{cases}$$

Así, en ausencia de errores, podríamos conseguir una eficiencia del 100% sin más que utilizar una ventana de envío tal que

$$N \geq 1 + 2a = 1 + 2 \frac{t_{prop}}{t_{trama}}$$

Por tanto, teniendo en cuenta que

$$t_{trama} = \frac{L_{trama}}{v_{trans}} = \frac{1000 \text{ bits}}{128 \cdot 10^3 \text{ bps}} = 7,8 \text{ ms}$$

$$t_{prop} = \frac{d}{v_{prop}} = \frac{1000 \cdot 10^3 \text{ m}}{2 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 5 \text{ ms}$$

Resulta,

$$N \geq 1 + 2 \cdot \frac{5}{7,8} = 2,28 \Rightarrow N \geq 3$$

- e) Recordemos que las confirmaciones en los protocolos de ventana deslizante son acumulativas. Así, el mandar una segunda trama de rechazo SREJ1 después de una trama SREJ0 implica que se está a la espera de recibir la trama 1 (rechazo de la trama 1) y se están confirmando todas las anteriores, lo cual es incorrecto. Por tanto, hasta que no se reciba correctamente la trama 0 no se puede enviar la trama de rechazo SREJ1.

20. Se dispone de dos entidades de enlace A (emisora) y B (receptora) que distan  $D$  km entre sí y se comunican mediante un protocolo de *ventana deslizante* de tamaño de ventana  $N$ , en el que se envían tramas de  $L$  bits a una tasa de  $R$  bps. Dicho protocolo está levemente modificado de modo que A debe esperar un tiempo de  $E$  segundos entre el envío de una trama y el de la siguiente. Calcule la eficiencia del sistema planteado, asumiendo que no existen errores en el canal.

21. Considere un enlace bidireccional que utiliza *adelante atrás*  $N$  con  $N=3$ , donde

- todas las tramas tienen una duración 1;
- se utilizan temporizadores de valor 2,5;
- el tiempo de propagación es 0,5 unidades;
- el tiempo de procesamiento es despreciable;
- los paquetes ACK tienen una duración 0,1.

Aceptando que las estaciones A y B comiencen con números de secuencia igual a 0, muestre el patrón de transmisiones para las siguientes secuencias:

- a) La estación A desea transmitir 4 tramas, comenzando en  $t=0$ , y todas se recibirán correctamente.
- b) La estación B desea enviar 4 tramas, comenzando en  $t=0$ , y todas se reciben correctamente excepto la 3, que se pierde.
- c) ¿Es adecuado el valor del temporizador? Justifique su respuesta y proponga, en su caso, el valor que considere adecuado.

### HDLC

22. Un enlace de comunicaciones a 1,5 Mbps utiliza HDLC para transmitir información a la Luna. ¿Cuál es el menor tamaño posible de trama que permita transmisión continua? La distancia entre la Tierra y la Luna es, aproximadamente, de 375000 km.

23. Dos estaciones se comunican a través de un enlace de satélite a 1 Mbps con un retardo de propagación de 270 ms. El satélite se limita a retransmitir de una estación a otra los datos recibidos, con un retardo de conmutación despreciable. Si se usan tramas HDLC de 1024 bits con números de secuencia de 3 bits, ¿cuál será el rendimiento máximo posible?; es decir, ¿cuál es el rendimiento de los bits de datos transportados en las tramas HDLC?
24. Una entidad de enlace debe enviar un mensaje de 1 KB a otra entidad de enlace destino. Se supone un tamaño máximo de trama de 2.560 bits, 48 de los cuales son de redundancia, una longitud del enlace (cableado) de 20 km y una velocidad de transmisión de 256 kbps. Lleve a cabo un diagrama del intercambio de tramas que tiene lugar si se produce un error en la segunda trama enviada y se utiliza ARQ *adelante-atrás* N. Muestre el estado de las ventanas en el emisor y en el receptor tras el envío de la trama errónea, tras su retransmisión y tras el envío de la última trama.
25. Se utiliza un satélite en órbita geoestacionaria (distancia orbital 35.700 km.) para posibilitar la comunicación entre dos ubicaciones que distan entre sí 1.000 km. Se usa HDLC en la capa de control de enlace. Para posibilitar una utilización óptima de la línea, se permite modificar el tamaño máximo de trama, si bien todas las tramas, incluidas las de supervisión y no numeradas, deben presentar el mismo tamaño por cuestiones operativas. Indique el menor tamaño de trama que posibilita un uso óptimo de la línea si la velocidad de transmisión es de 1 Mbps.

HDLC es un protocolo de control de enlace que utiliza ventana deslizante. En este tipo de protocolos, el rendimiento es óptimo, e igual a 1 en ausencia de errores, si se produce un desplazamiento continuo de la ventana. Para ello, debe cumplirse que el tiempo empleado en el envío de una trama y la recepción de su correspondiente confirmación sea inferior al tiempo empleado en transmitir las N tramas de la ventana de envío. Es decir,

$$Nt_{trama} \geq t_{trama} + 2t_{prop} + t_{ack} + t_{proc}$$

Nótese que, en el caso de tiempos de procesamiento y confirmación despreciables, la condición anterior proporciona la expresión del rendimiento

$$U = \begin{cases} 1 & \text{si } N \geq 1 + 2a \\ \frac{1}{1 + 2a} & \text{si } N < 1 + 2a \end{cases}$$

Siendo a el cociente entre el tiempo de propagación y el tiempo de trama

$$a = \frac{t_{prop}}{t_{trama}}$$

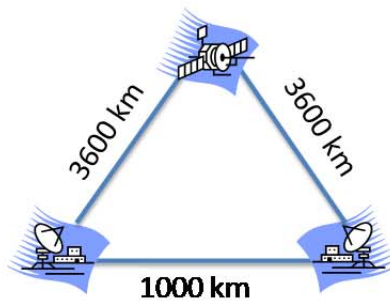
En el caso que nos ocupa, se indica que todas las tramas deben tener el mismo tamaño, lo que implica que el tamaño de las confirmaciones será igual al tamaño de una trama,  $t_{ack} = t_{trama}$ . Por tanto, la condición de eficiencia óptima resulta

$$Nt_{trama} \geq 2t_{trama} + 2t_{prop} \Rightarrow N \geq 2 + 2a$$

Dado que se usa HDLC, el tamaño máximo de la ventana de envío será de 7 (numeración de secuencia de 3 bits) o de 127 (numeración de secuencia de 7 bits). Como se pide el tamaño mínimo de trama que posibilita una transmisión continua, consideraremos el caso más favorable. Evidentemente, este caso corresponderá al uso de 7 bits para numeración de secuencia, con lo que  $N=127$ .

El tiempo de propagación de la señal será el necesario para, vía satélite, alcanzar la otra estación.





Dado que el satélite opera como un repetidor, no habrá retransmisión ni demora en la señal debida al satélite y el sistema será equivalente a considerar como distancia el doble de la distancia al satélite. Por otra parte, podemos considerar despreciable la distancia (1000 km) entre ambas estaciones respecto de la distancia al satélite, por lo que la distancia a recorrer, será

$$d = 2 \cdot 36000 \text{ km} = 72000 \text{ km}$$

Por tanto, teniendo en cuenta que la transmisión será en el vacío, tendremos

$$a = \frac{t_{prop}}{t_{trama}} = \frac{d/c}{L/v_t} = \frac{72 \cdot 10^6 \text{ m} / 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{L / 10^6 \text{ bps}} = \frac{2,4 \cdot 10^5}{L}$$

Finalmente,

$$127 \geq 2 + 2a \Rightarrow 127 \geq 2 + 2 \frac{2,4 \cdot 10^5}{L} \Rightarrow L \geq 3840 \text{ bits}$$

26. Dos entidades que usan el protocolo HDLC con *repetición selectiva* desean intercambiar entre sí dos archivos de 5.000 kbits de datos. Realice un esquema comentado del intercambio de tramas y de los estados de las ventanas de emisión y recepción suponiendo que una de cada 4 tramas de datos se recibe erróneamente. Se utiliza numeración de secuencia de 3 bits, detección de errores mediante CRC-16 y un tamaño de trama de 1.024 bits. La velocidad de transferencia es de 10 Mbps y la distancia entre estaciones 1 km. Suponga que el tiempo de procesamiento es despreciable y que todos los ACK son incorporados a tramas informativas.