

Capítulo **6**. CONTROL DE FLUJO EN EL NIVEL DE ENLACE

Una de las funciones implementadas habitualmente por los protocolos de nivel de enlace es el control de flujo de la transmisión. Este tipo de protocolos permiten garantizar que un equipo receptor no llegue a verse colapsado por recibir una gran cantidad de información procedente de otro equipo emisor. A lo largo de este capítulo se describirá el protocolo de parada y espera así como el de ventana deslizante y se mostrará como pueden utilizarse para controlar el flujo de datos que se intercambia en una comunicación.

6.1 Introducción

Como se indicó en el capítulo anterior, una de las funciones que habitualmente implementa el nivel de enlace de las arquitecturas de red es el control del flujo de la transmisión de datos entre el emisor y el receptor. El control de flujo se emplea para evitar que el receptor sea saturado por el envío de datos desde un emisor. Cualquier dispositivo de recepción tiene una cantidad limitada de memoria para almacenar datos y una velocidad limitada para procesarlos. El control de flujo permitirá restringir la cantidad de datos que el emisor envía al receptor. Esto permitirá que la memoria reservada en el receptor no llegue a desbordarse mientras éste se encuentra procesando datos que le habían llegado con anterioridad.

A lo largo de este capítulo se describirán 2 métodos para el control de flujo implementados por el nivel de enlace:

- Parada y espera.
- Ventana deslizante.

6.2 Protocolo de parada y espera

6.2.1 Parada y espera en ausencia de errores

En este método, el emisor espera un reconocimiento después de cada trama que se envía. Sólo se podrá enviar la siguiente trama cuando se recibe el reconocimiento. Para estudiar el funcionamiento de las técnicas de control de flujo se hará uso de un esquema como el que se muestra en la Figura 6-1. En este tipo de esquemas se representa el tiempo con una línea vertical. En estos esquemas se representa la dependencia temporal entre las tramas intercambiadas entre el emisor y el receptor. Con las flechas se indica el tránsito de tramas por el medio de comunicación, de forma que una flecha representará que una única trama circula por el medio físico que une las dos estaciones. El sentido de la flecha indica si la trama es enviada por el emisor o recibida por éste. Además, a menudo se identificarán las tramas de datos como Datos 0, Datos 1, etc. y las tramas de confirmación como ACK (del inglés Acknowledgment).

La principal ventaja del protocolo de parada y espera es su facilidad de implementación. Sin embargo, no aprovecha el canal lo suficiente (en el Apartado 6.2.4 se realiza un análisis de las prestaciones de este protocolo). En la Figura 6-1 se muestra el funcionamiento del protocolo de parada y espera. En este caso se supone que todas las tramas que se transmiten se reciben con éxito y además llegan en el mismo orden en el que se enviaron. Se observa como, una vez que la estación destino recibe una trama de datos, indica al emisor su deseo de aceptar otra trama mediante el envío de una confirmación de la trama que acaba de recibir. Además, la estación emisora queda a la espera de recibir la confirmación antes de proceder a realizar el envío de una nueva.

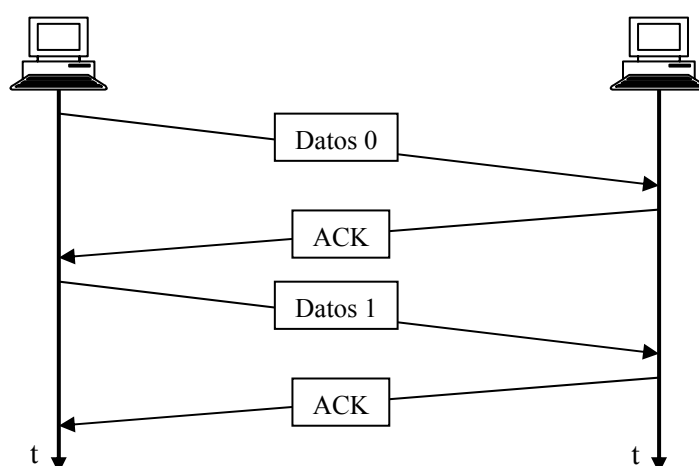


Figura 6-1. Protocolo de parada y espera.

6.2.2 Parada y espera con errores

Un caso particular es la implementación del protocolo de parada y espera considerando la posibilidad que puedan producirse errores y que estos errores puedan provocar la pérdida de tramas. Para ello, cada vez que el emisor envía una trama, le asigna un identificador, inicia un temporizador y queda a la espera de la llegada del asentimiento (ACK). Cuando expira el temporizador, si no ha llegado el ACK se procede al reenvío de la trama. El temporizador expirará cuando por algún motivo el ACK enviado por el receptor se pierde o bien éste no llega a enviarlo. Esto último puede deberse a que el paquete de datos sea recibido con errores o bien no llegue al receptor.

En la Figura 6-2 se muestra un ejemplo de aplicación del protocolo de parada y espera con numeración de tramas en el que la trama de datos “Datos 0” se pierde antes de llegar al receptor. En este caso, cuando expira el temporizador la trama de datos vuelve a ser enviada.

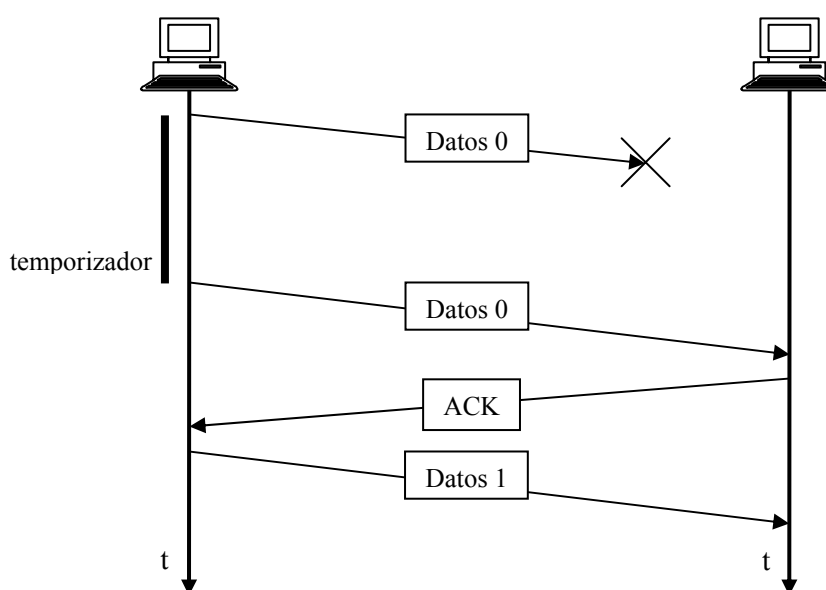


Figura 6-2. Protocolo de parada y espera con errores.

En la Figura 6-3 se describe el caso en el que se pierde la confirmación de la trama “Datos 0”. Igual que en el caso anterior expiraría el temporizador y se volvería a enviar la trama “Datos 0”. Sin embargo, como el receptor ya la había recibido previamente, esta trama le llega duplicada. Como se ha realizado una numeración previa de las tramas el receptor es capaz de identificar que la trama le ha llegado duplicada, por lo que la descarta y vuelve a enviar la confirmación.

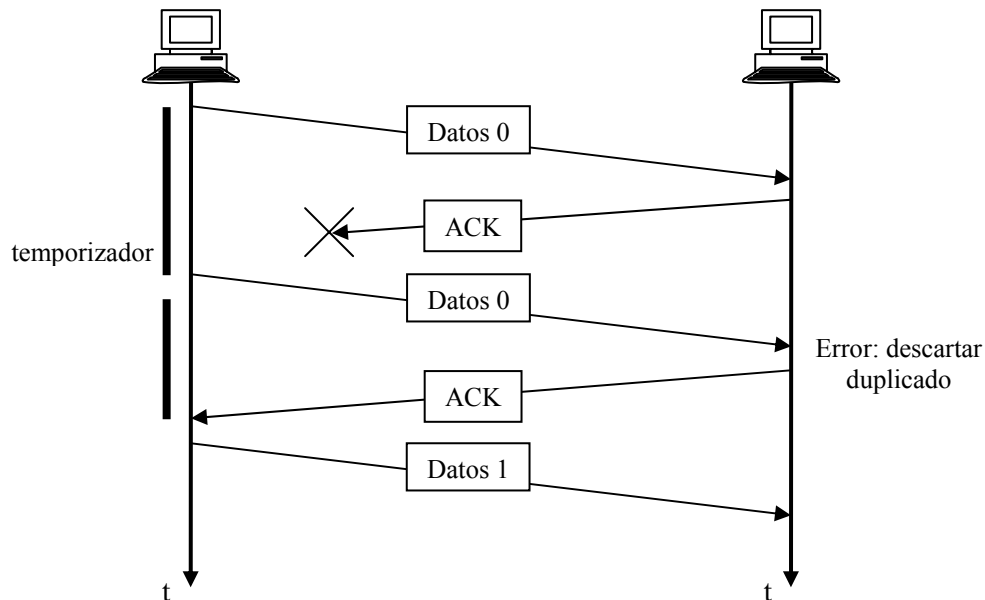


Figura 6-3. Protocolo de parada y espera con errores (tramas duplicadas).

Un problema adicional es el que se muestra en la Figura 6-4. Se observa que el retraso en la llegada de la confirmación de “Datos 0” provoca, no solo la generación de tramas duplicadas, sino también la pérdida de sincronización. El retraso de la primera confirmación de Datos 0 provoca que se interpreten las confirmaciones de las tramas de datos de forma incorrecta. En este ejemplo, la segunda confirmación de Datos 0 es interpretada por el emisor como la confirmación de Datos 1. Así, la confirmación de Datos 1 será interpretada por el emisor como la de Datos 2 y así sucesivamente. La solución a este problema consiste en numerar también las confirmaciones (véase Figura 6-5).

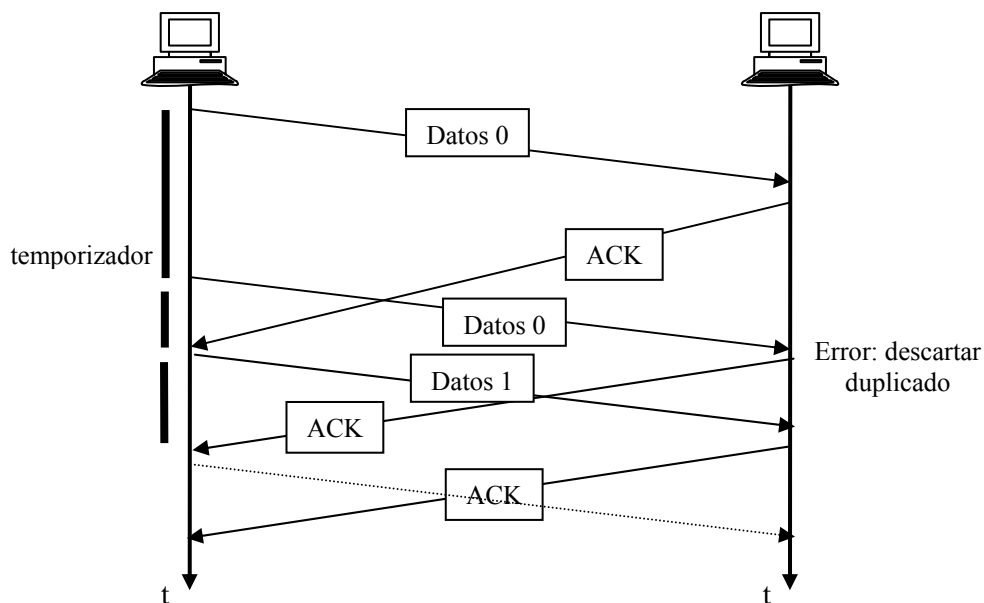


Figura 6-4. Protocolo de parada y espera con errores (tramas duplicadas y pérdida de sincronización).

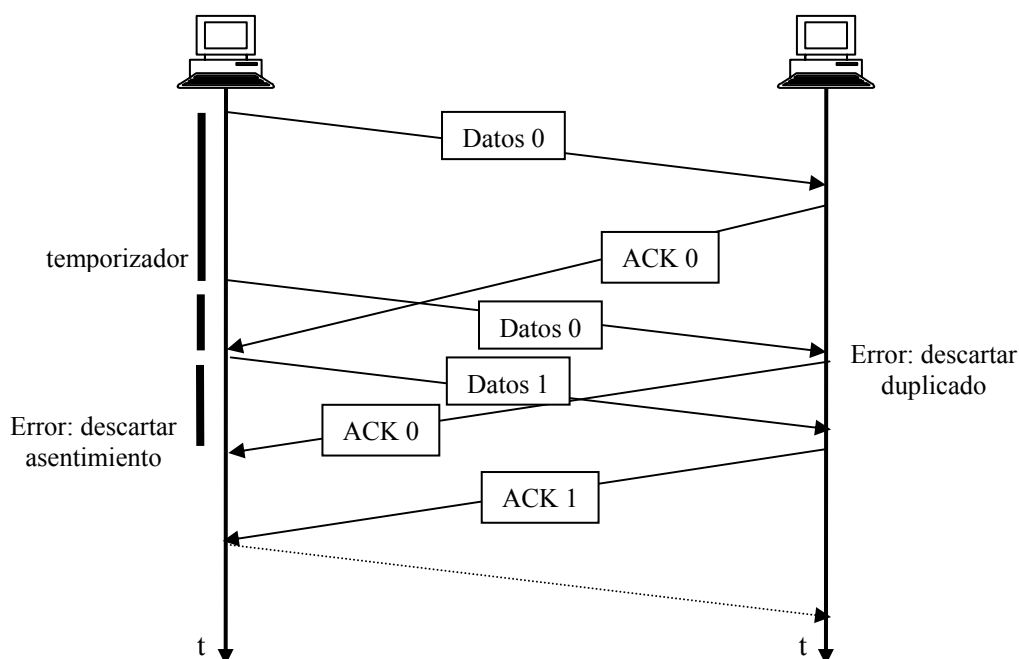


Figura 6-5. Protocolo de parada y espera con errores. Numeración de tramas y asentimientos.

6.2.3 Protocolo bilateral de parada y espera

Los protocolos descritos en los apartados 6.2.1 y 6.2.2 se aplican únicamente a enlaces simplex, es decir, transmisión únicamente en el sentido emisor \rightarrow receptor. El protocolo bilateral de parada y espera permite extender el protocolo de parada y espera a enlaces semiduplex y duplex. Para ello se considera que las dos estaciones son emisoras y receptoras de tramas de datos. A su vez, son emisoras y receptoras de confirmaciones. En este caso se aprovecha la trama de datos a enviar para confirmar la trama de datos inmediatamente recibida (véase Figura 6-6). Este procedimiento se denomina de incorporación de confirmación (piggybacking en inglés). Por tanto, si una estación tiene para enviar una confirmación además de datos, lo hará conjuntamente utilizando una sola trama, ahorrando así capacidad del canal. Por supuesto, si una estación tiene que enviar una confirmación pero no tiene datos, se enviará una trama de confirmación convencional ACK. Si la estación tiene datos para enviar pero nada que confirmar, deberá repetir el último número de secuencia de confirmación enviado con anterioridad. Esto se debe a que en la trama de datos se prevé un campo para el número de confirmación y, por tanto, habrá que especificar algún valor en el mismo. Cuando una estación reciba una confirmación repetida, simplemente la ignorará.

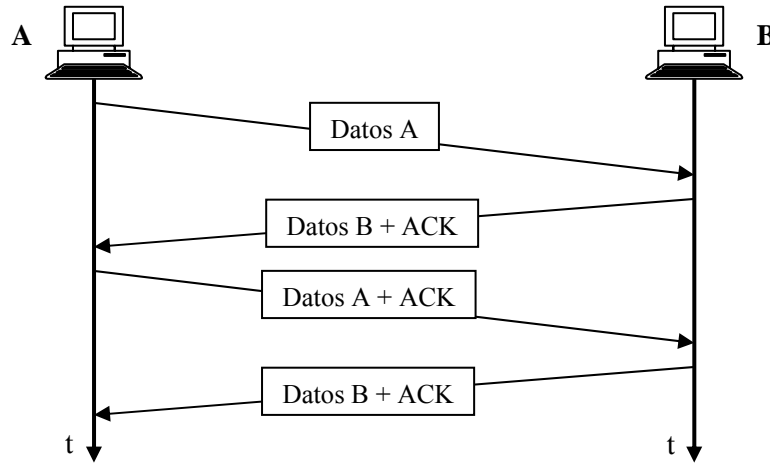


Figura 6-6. Protocolo bilateral de parada y espera.

6.2.4 Análisis de las prestaciones del protocolo de parada y espera

Independientemente del tipo de protocolo de parada y espera que se haya implementado se dice que se hace control de flujo porque el destino puede parar el flujo de los datos sin más que retener las confirmaciones. En general, el procedimiento es eficaz y funciona adecuadamente cuando los datos a transmitir se envían empleando pocas tramas de gran tamaño.

A continuación se va a determinar la eficiencia de una línea punto a punto half-duplex donde se usa el esquema de parada y espera unilateral. Para ello, se va a considerar que la estación emisora desea enviar un total de datos T que los fragmenta en un conjunto de n tramas. Además, el emisor envía las tramas de datos numeradas como Datos 0, Datos 1, Datos 2, etc. y la estación receptora confirma esas tramas como ACK0, ACK1, ACK2, etc. Así, el tiempo total que necesitaría el equipo emisor para transmitir los T datos sería nT_i , siendo T_i el tiempo necesario para transmitir la trama de datos Datos i y recibir su confirmación. Así, el tiempo total para enviar los datos de una trama se puede definir como:

$$T_i = t_{tx} + t_{prop} + t_{procT} + t_{conf} + t_{prop} + t_{procC} \quad (6.1)$$

donde:

t_{tx} = tiempo de transmisión de la trama.

t_{prop} : tiempo de propagación de la trama/confirmación.

t_{procT} : tiempo de procesamiento de la trama.

t_{conf} : tiempo de transmisión de la confirmación.

t_{procC} : tiempo de procesamiento de la confirmación.

Normalmente t_{procT} , t_{conf} y t_{procC} se consideran despreciables respecto al resto de los términos, por lo que la Ecuación (6.1) quedará:

$$T_i = t_{tx} + 2t_{prop} \rightarrow T = (t_{tx} + 2t_{prop})n \quad (6.2)$$

De todo el tiempo T_i definido en la Ecuación (6.2) únicamente se destina a transmitir la trama un tiempo igual a t_{tx} , por lo que la utilización de la línea o eficiencia será:

$$e = \frac{t_{tx}}{t_{tx} + 2t_{prop}} \quad (6.3)$$

Si se define $a = t_{prop}/t_{tx}$ la expresión (6.3) queda como:

$$e = \frac{1}{1 + 2a} \quad (6.4)$$

Por otro lado, el tiempo de propagación, t_{prop} , es igual a la distancia del enlace, d , dividida por la velocidad de propagación, V . Para transmisiones no guiadas a través del aire o el espacio, V es la velocidad de la luz (aproximadamente igual a 3×10^8 m/s). Para transmisiones guiadas V es aproximadamente igual a 0,67 veces la velocidad de la luz. Además, el tiempo de transmisión, t_{tx} , es igual a la longitud de la trama en bits, L , dividida por la velocidad de transmisión, R , por lo tanto:

$$a = \frac{T_{prop}}{T_{tx}} = \frac{\frac{d}{V}}{\frac{L}{R}} = \frac{Rd}{VL} \quad (6.5)$$

Cuando a es menor que 1, el tiempo de propagación es menor que el de transmisión. En este caso, la trama es lo suficientemente grande para que los primeros bits de la misma lleguen al destino antes de que el origen haya concluido la transmisión de dicha trama. Cuando a es mayor que 1, el tiempo de propagación es mayor que el de transmisión. En este caso, el emisor completa la transmisión de toda la trama antes que el primer bit de la misma llegue al receptor. Es decir, para velocidades de transmisión y/o distancias grandes es aconsejable la utilización de valores grandes de a . En la Figura 6-7 se muestra el comportamiento de parada y espera con $a > 1$. En esta figura se representa el proceso de transmisión de la trama de datos (rectángulo sombreado) y al final se muestra la transmisión de la trama de confirmación correspondiente. Se considera que el tiempo de transmisión es 1, por lo que el tiempo de propagación será igual a a . En esta figura puede observarse que la línea está infrautilizada.

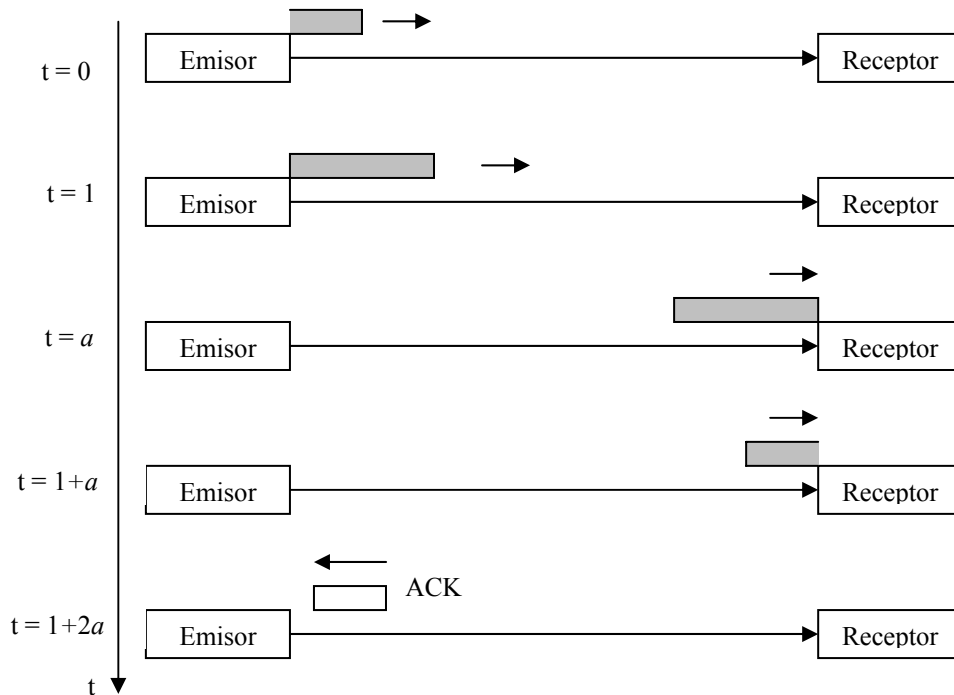


Figura 6-7. Protocolo de parada y espera. $a > 1$.

Por último, en la Figura 6-8 se describe el proceso de transmisión de una trama y su confirmación considerando $a < 1$. En este caso se mejora la utilización del canal, sin embargo, también se utiliza de manera ineficiente. En general, el control de flujo mediante parada y espera da lugar a una utilización ineficiente del canal cuando se emplean velocidades de transmisión muy altas entre estaciones muy distantes. Con el objetivo de mejorar el aprovechamiento del canal en el Apartado 6.3 se describirá el protocolo de ventana deslizante.

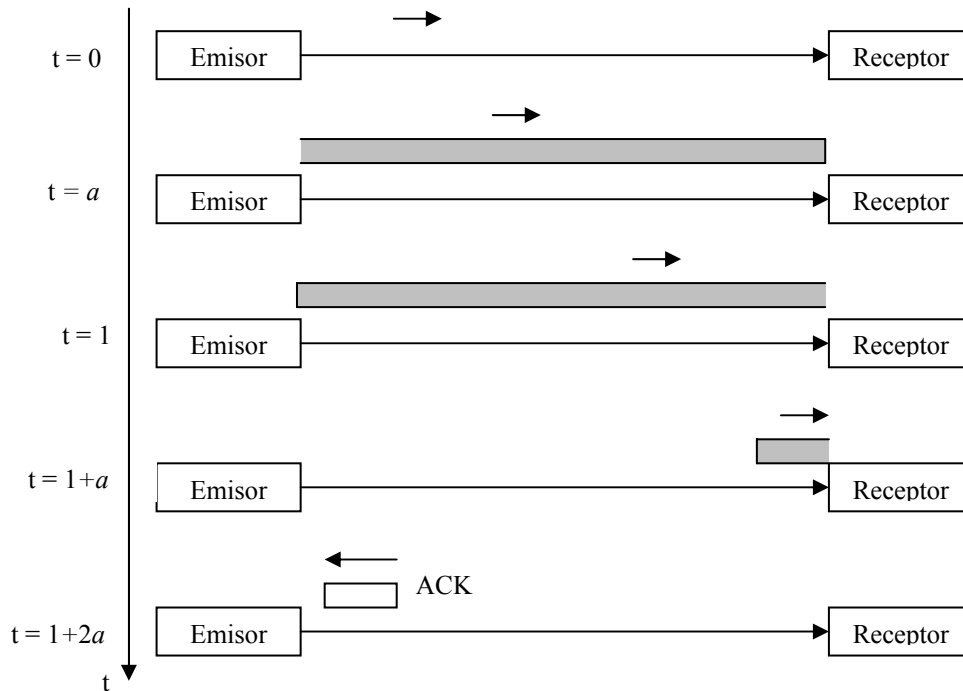


Figura 6-8. Protocolo de parada y espera. $a < 1$.

6.3 Protocolo de ventana deslizante

6.3.1 Características del protocolo de ventana deslizante

El poco aprovechamiento del canal del protocolo de parada y espera se debe fundamentalmente a que sólo puede haber en circulación una trama. En el protocolo de ventana deslizante se mejora este aspecto permitiendo que se transmitan varias tramas al mismo tiempo sobre el enlace. Haciendo uso del protocolo de ventana deslizante el emisor puede enviar varias tramas antes de necesitar un reconocimiento. Se emplea numeración para la identificación tanto de las tramas de datos como de las tramas de confirmación. Para realizar la numeración se emplea un total de n bits por lo que el rango de numeración será de 0 a $2^n - 1$.

Para el funcionamiento del protocolo de ventana deslizante el receptor hace uso de una memoria temporal de suficiente tamaño para almacenar W tramas. Considerando este tamaño en la memoria del receptor, el emisor podrá enviar hasta un total de W tramas sin necesidad de recibir confirmación. Como se ha indicado anteriormente, cada trama de datos va numerada con un identificador o número de secuencia. El receptor envía en las confirmaciones el número de secuencia de la siguiente trama que se espera recibir. Con esto quedarán confirmadas todas las tramas anteriores.

Una vez descrito el funcionamiento básico, a continuación se va a mostrar el comportamiento del algoritmo desde el punto de vista del emisor y del receptor.

Desde el punto de vista del emisor, se emplea una ventana que almacena las tramas que pueden ser enviadas y aquellas de las que todavía que no se ha recibido confirmación. En la Figura 6-9 se muestra una forma de representar la ventana del emisor. El rectángulo sombreado representa las tramas que se pueden transmitir. Cada vez que se envíe una trama, la ventana sombreada reducirá su tamaño en una unidad por el límite inferior (la ventana se cierra). Además, cada vez que se reciba una trama de confirmación la ventana se abrirá y aumentará su tamaño. Las tramas comprendidas entre la barra vertical y la ventana son aquellas que ya han sido enviadas pero que están pendientes de confirmación. El emisor debe almacenar estas tramas en una memoria temporal por si hubiera que retransmitirlas.

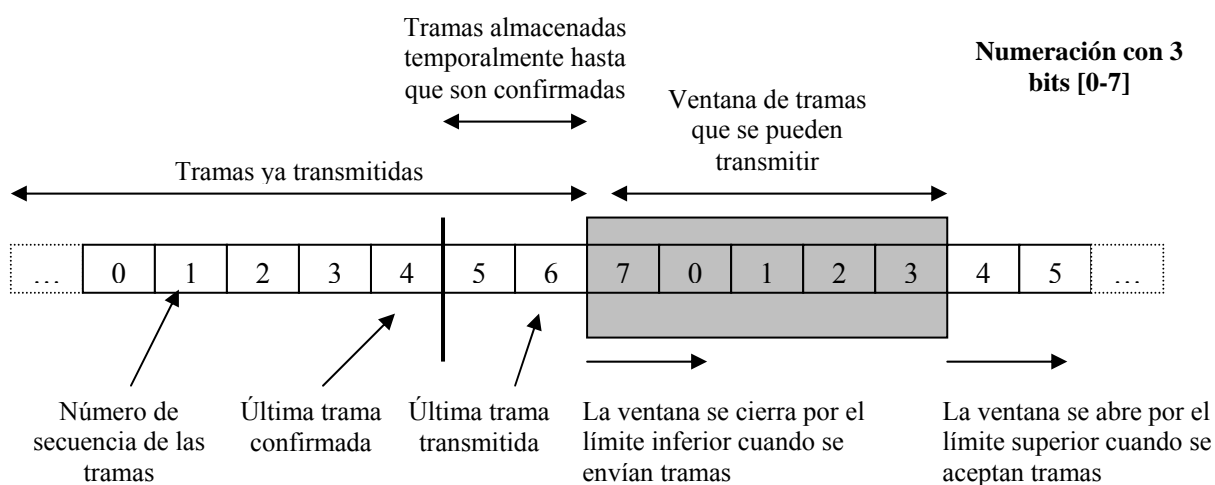


Figura 6-9. Ventana del emisor.

Desde el punto de vista del receptor, se emplea una ventana que indica las tramas que se espera recibir y para las que se enviará confirmación (véase la Figura 6-10).

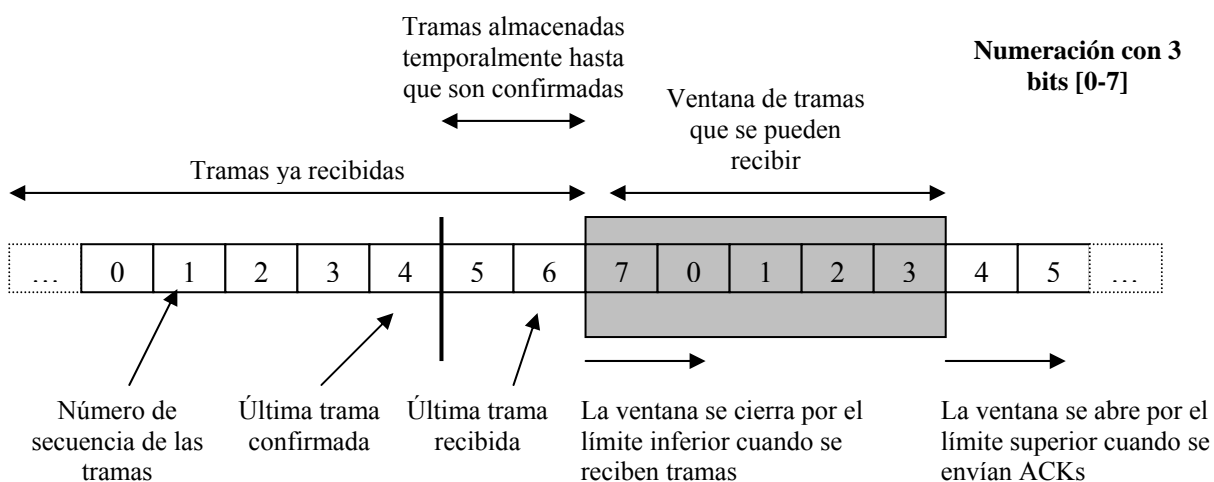


Figura 6-10. Ventana de receptor.

Ejercicio 5.1

Control de flujo con ventana deslizante sin errores.

A continuación se va a mostrar una traza del protocolo de ventana deslizante sin errores considerando numeración de 3 bits (las ventanas permiten almacenar un máximo de 7 tramas). Inicialmente el emisor puede transmitir las tramas de 0-6 y el receptor puede recibir las tramas de 0-6. Cuando el emisor transmite las tramas de datos 0-2 la ventana del emisor se cierra tres unidades presentando únicamente un tamaño de 4 tramas. Mantiene una copia de las tres primeras tramas a la espera de su confirmación. Cuando el receptor confirma con ACK3 está indicando que le ha llegado correctamente hasta la trama 2 por lo que a continuación la ventana de emisor vuelve a presentar su tamaño original. En la traza también puede observarse que el receptor recibe las tramas de datos 4-6 pero no las confirma. Esto provoca que la ventana del receptor se reduzca de tamaño y que estas tramas queden almacenadas en una memoria temporal del receptor hasta que finalmente se confirmen.

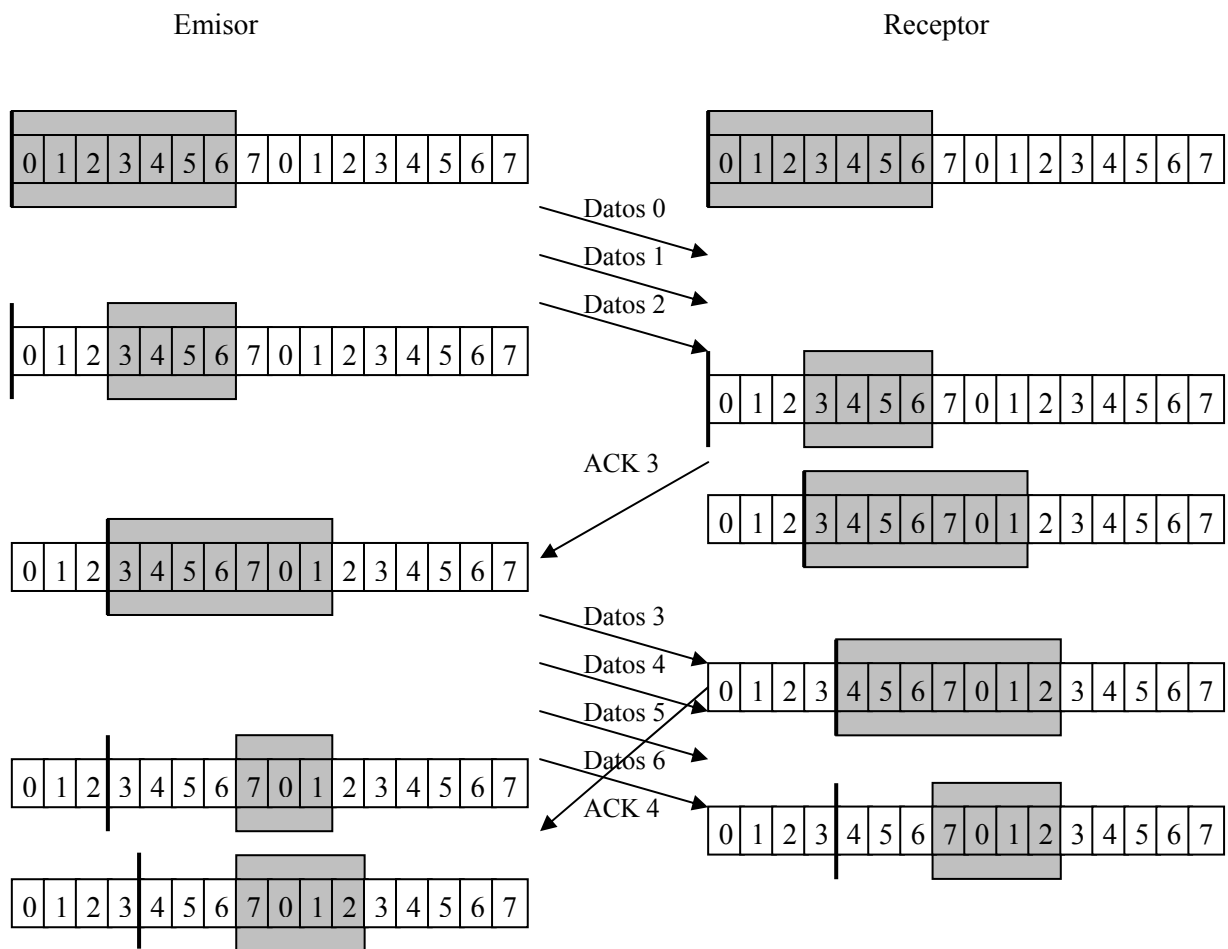


Figura 6-11. Ejemplo de ventana deslizante con numeración de 3 bits.

Empleando un protocolo de ventana deslizante se puede controlar el flujo de datos ya que el receptor sólo acepta las W tramas siguientes a la última que ha confirmado (siendo W el tamaño de la ventana del receptor). La mayoría de los protocolos permiten que una estación pueda interrumpir totalmente la transmisión de tramas desde el otro extremo mediante el envío de un mensaje de tipo RNR (receptor no preparado), con el que se confirman las tramas anteriores pero se prohíbe la transmisión de tramas adicionales. Por lo tanto, si el receptor envía la trama RNR 6 querrá informar que se han recibido correctamente todas las tramas de datos hasta la 5 pero no se aceptarán más. En cuanto el receptor vuelva a transmitir una trama ACK querrá decir que vuelve a aceptar más tramas de

datos. A menudo, en los protocolos de ventana deslizante las tramas de confirmación también son denominadas como mensajes de tipo RR (Receiver Ready, Receptor preparado).

Al igual que se describió en el apartado 6.2.3 para el protocolo de parada y espera, también se puede realizar la comunicación bidireccional empleando ventana deslizante. En este caso, cada estación deberá mantener dos ventanas (una para transmitir y otra para recibir). Para ello, se emplea la misma técnica que la descrita en el apartado 6.2.3, es decir, cada trama de datos incluye un campo en el que se indica el número de secuencia de la trama más un campo adicional con el número de secuencia que se confirma.

Según los tamaños de la ventana del emisor, W_e , y la ventana del receptor, W_r , se definen las siguientes variantes del protocolo de ventana deslizante:

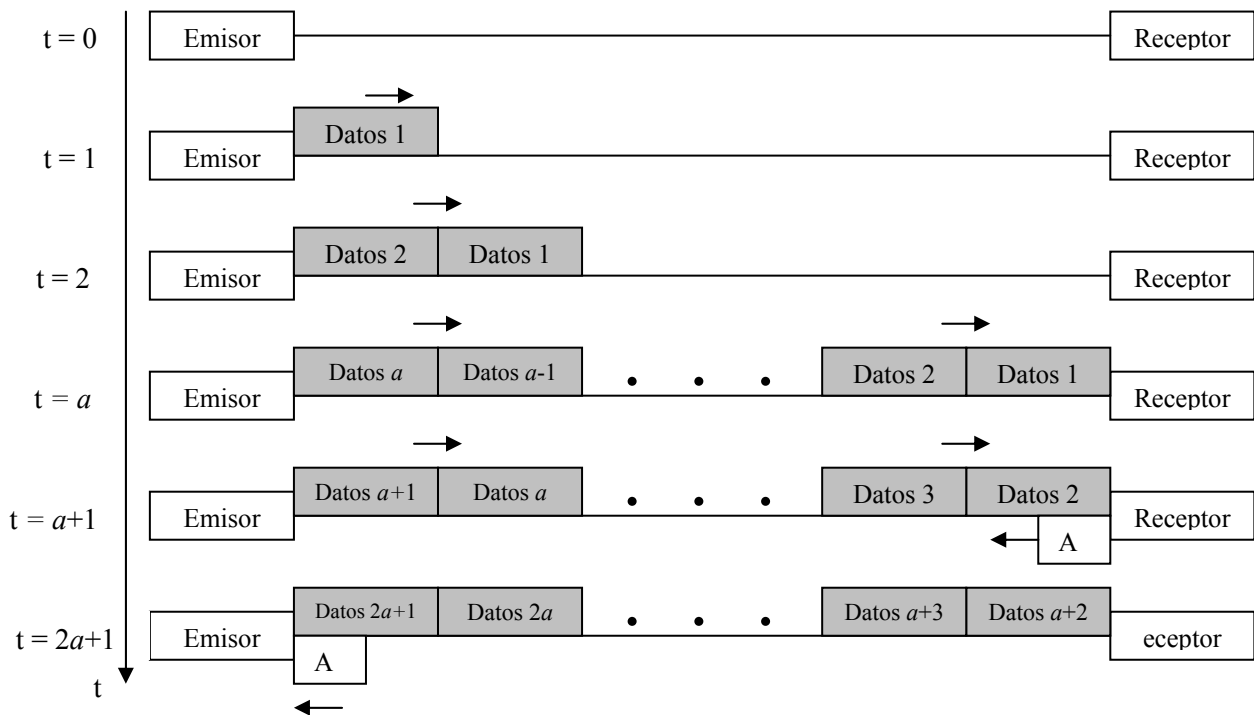
- $W_e = 1$, $W_r = \text{cualquiera}$. El comportamiento del protocolo sería el mismo que el protocolo de parada y espera bidireccional. El emisor envía las tramas de datos de una en una.
- $W_e > 1$, $W_r = 1$. Se trata del protocolo de ventana deslizante de envío continuo con repetición no selectiva. El emisor puede enviar un cierto número de tramas antes de recibir sus confirmaciones. Así, se aprovecha mucho mejor el medio.
- $W_e > 1$, $W_r > 1$. Mejora el caso anterior para aumentar la eficiencia cuando se produzcan errores. Si no se produjeran errores el aprovechamiento del medio sería similar al caso anterior. Si el receptor recibe una trama errónea la descarta y no envía su ACK, pero acepta otras posteriores que estén en la ventana del receptor. El receptor confirma las tramas tras un error con el ACK de la recibida correctamente antes del error. A continuación las tramas que va recibiendo el receptor las guarda en su lista hasta que tiene la primera y las pasa al nivel de red ordenadas. Seguidamente ya puede confirmar todas las tramas con un ACK de la última recibida correctamente. Con esto quedarán confirmadas todas las anteriores.

En el capítulo 8 se describirán algunos ejemplos de protocolos estandarizados que emplean ventana deslizante para realizar el control de flujo de la transmisión.

6.3.2 Análisis de las prestaciones del protocolo de parada y espera

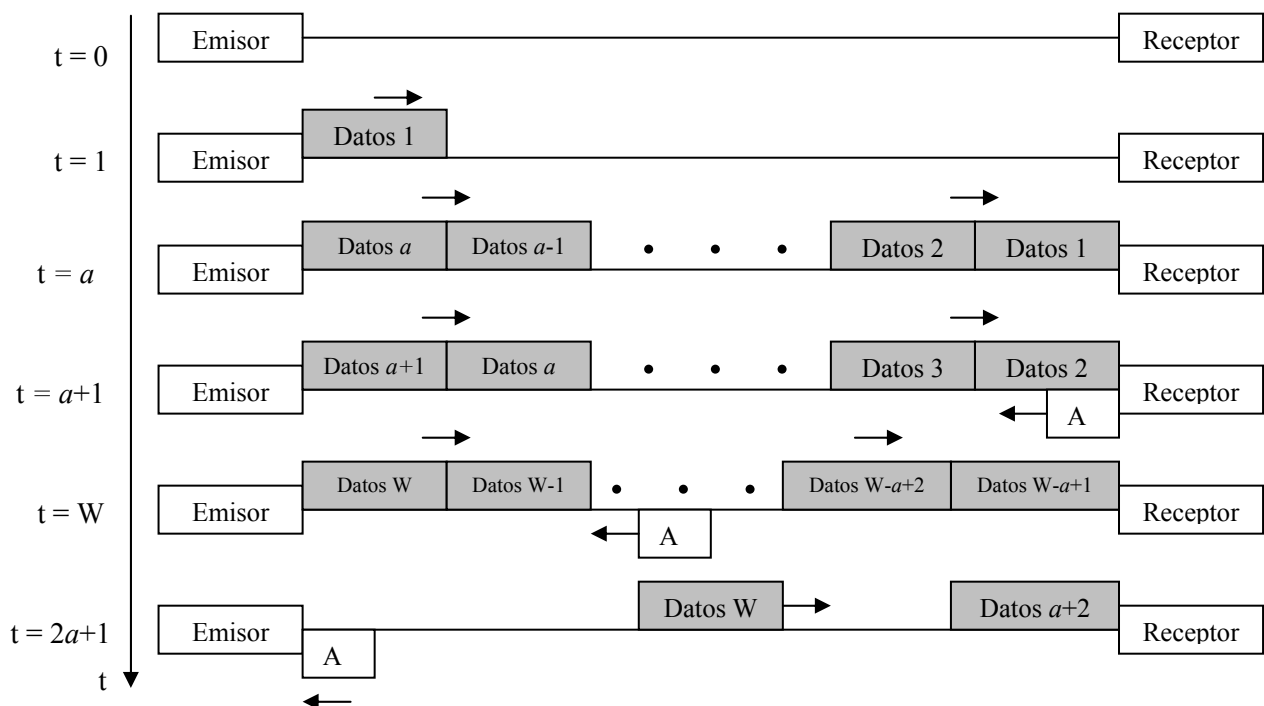
El control de flujo mediante ventana deslizante es mucho más eficiente que el de parada y espera debido a su mejor aprovechamiento del canal. El grado de utilización del canal depende directamente del tamaño de la ventana W , así como del valor de a definido en el Apartado 6.2.4. Al igual que se hizo en la Figura 6-7 se va a considerar el tiempo de transmisión de la trama igual a la unidad, por lo que el tiempo de propagación será igual a a .

Supóngase en primer lugar que $W \geq 2a+1$. La confirmación de la primera trama enviada llega antes de que ésta agote su ventana. Por tanto, la estación emisora puede transmitir continuamente sin necesidad de detener la transmisión para quedarse a la espera de confirmaciones. Por lo tanto, la eficiencia será de 1.


 Figura 6-12. Ventana deslizante. $W \geq 2a+1$.

En el caso de que $W < 2a+1$ la estación transmisora no podrá enviar más tramas de datos en el momento $t=2a+1$ ya que se llena la ventana del emisor (véase Figura 6-13). Por lo tanto, la utilización de la línea es W unidades de tiempo por cada periodo $2a+1$, o lo que es lo mismo la eficiencia será:

$$e = \frac{W}{2a+1} \quad (6.6)$$


 Figura 6-13. Ventana deslizante. $W < 2a+1$.

Ejercicio 5.2

Dos equipos de datos (DTEs) implementan un protocolo de parada y espera para la transferencia de ficheros. Las tramas que se emplean para enviar bloques de datos son de 200 bits, incluyendo datos, cabeceras, colas y demás bits de control. Si la velocidad de transmisión del enlace de datos en ambos sentidos es de 64Kbits/s, y la velocidad de propagación de las señales por el medio físico es de $2 \cdot 10^8$ m/s, se pide:

- Calcula la máxima distancia de separación entre los ETD para conseguir una eficiencia en el protocolo, sin errores, de al menos el 95%.
- ¿Cuál sería el valor del temporizador de retransmisión de tramas más adecuado en las condiciones del apartado anterior, para el caso en que se produzcan errores de pérdida de trama?
- Proponga un nuevo mecanismo de control de flujo distinto al parada y espera (de entre los descritos en este capítulo) que permita una eficiencia del 100% cuando la distancia entre DTEs sea de 1000Km. Calcula el parámetro más significativo que permite determinar el intercambio de tramas para este mecanismo de control de flujo.

Apartado a:

Si el tiempo de confirmación ACK y el tiempo de proceso es despreciable, entonces el tiempo del envío de una trama y su confirmación, viene dado por:

$$T_i = t_{tx} + t_{prop} + t_{procT} + t_{conf} + t_{prop} + t_{procC} = t_{tx} + 2t_{prop}$$

$$t_{procT} = t_{conf} = t_{procC} = 0$$

Por otro lado, el tiempo de propagación y el tiempo de transmisión de la trama puede calcularse según los datos aportados por el problema de la siguiente manera (nótese que la distancia a calcular se ha representado como d):

$$t_{prop} = \frac{d}{2 \cdot 10^8}$$

$$t_{tx} = \frac{200 \text{ bits}}{64 \cdot 10^3 \text{ bits/s}} = 3.125 \text{ ms}$$

Según se ha determinado en la Ecuación (6.3), la eficiencia puede calcularse de la siguiente manera:

$$e = \frac{t_{tx}}{t_{tx} + 2t_{prop}} = \frac{3,125}{3,125 + \frac{2d}{2 \cdot 10^8}} \geq 0,95$$

Despejando de la expresión anterior la distancia, d, puede determinarse que la distancia máxima de separación entre los DTEs es de 16447,3 m.

Apartado b:

A partir de la distancia máxima obtenida en el apartado anterior se puede calcular el tiempo total necesario para el envío de una trama de la siguiente manera:

$$T_i = t_{tx} + 2t_{prop} = 3.125 + \frac{2 \cdot 16447,3}{2 \cdot 10^8} = 3,2895 \text{ mseg}$$

Por lo tanto, transcurrido este tiempo debería haberse recibido la confirmación de la trama de datos. De forma que esta debería ser la duración del temporizador ya que si no se ha recibido la confirmación será porque ha ocurrido un error en la transmisión.

Apartado c:

El protocolo que permite una eficiencia es el de ventana deslizante considerando que el tamaño de ventana, W , es mayor o igual que $2a+1$ en la transmisión, siendo a la relación entre el tiempo de propagación y el tiempo de transmisión de la trama.

El tiempo de propagación para este caso será:

$$t_{\text{prop}} = \frac{1000 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^8} = 5 \text{mseg}$$

Además, para conseguir una eficiencia del 100% es necesario que:

$$W \geq 2a + 1 = 2 \frac{t_{\text{prop}}}{t_{\text{tx}}} + 1 = \frac{2 \cdot 5}{3,125} + 1 = 4,2$$

Por lo tanto, el tamaño de la ventana empleada deberá ser mayor o igual que 5 para conseguir una eficiencia del 100%.