

Capítulo 3

La Capa de Enlace

Rogelio Montañana

Departamento de Informática

Universidad de Valencia

rogelio.montanana@uv.es

<http://www.uv.es/~montanan/>

Modificado por: Ing. Gabriel Filippa

Sumario

- **Funciones de la capa de enlace**
- Protocolos de parada/espera
- Protocolos con ventana deslizante
- Protocolos de nivel de enlace: HDLC, PPP (Internet) y LAP-F (Frame Relay)
- Nivel de enlace en ATM

Capa de Enlace

Provee el control de la capa física

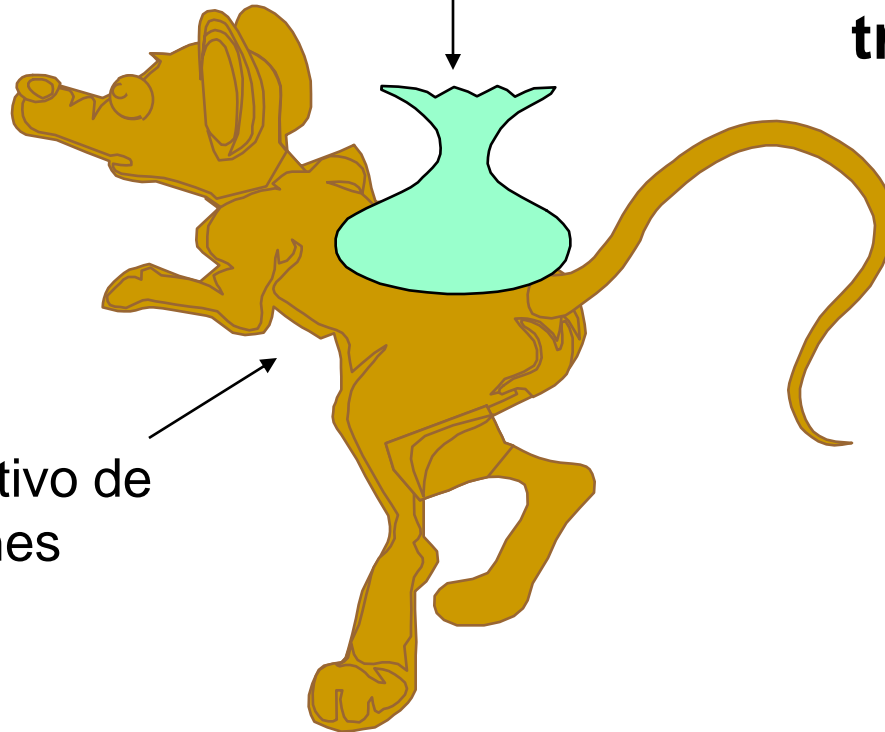
Detecta y/o corrige Errores de transmisión

Datos puros

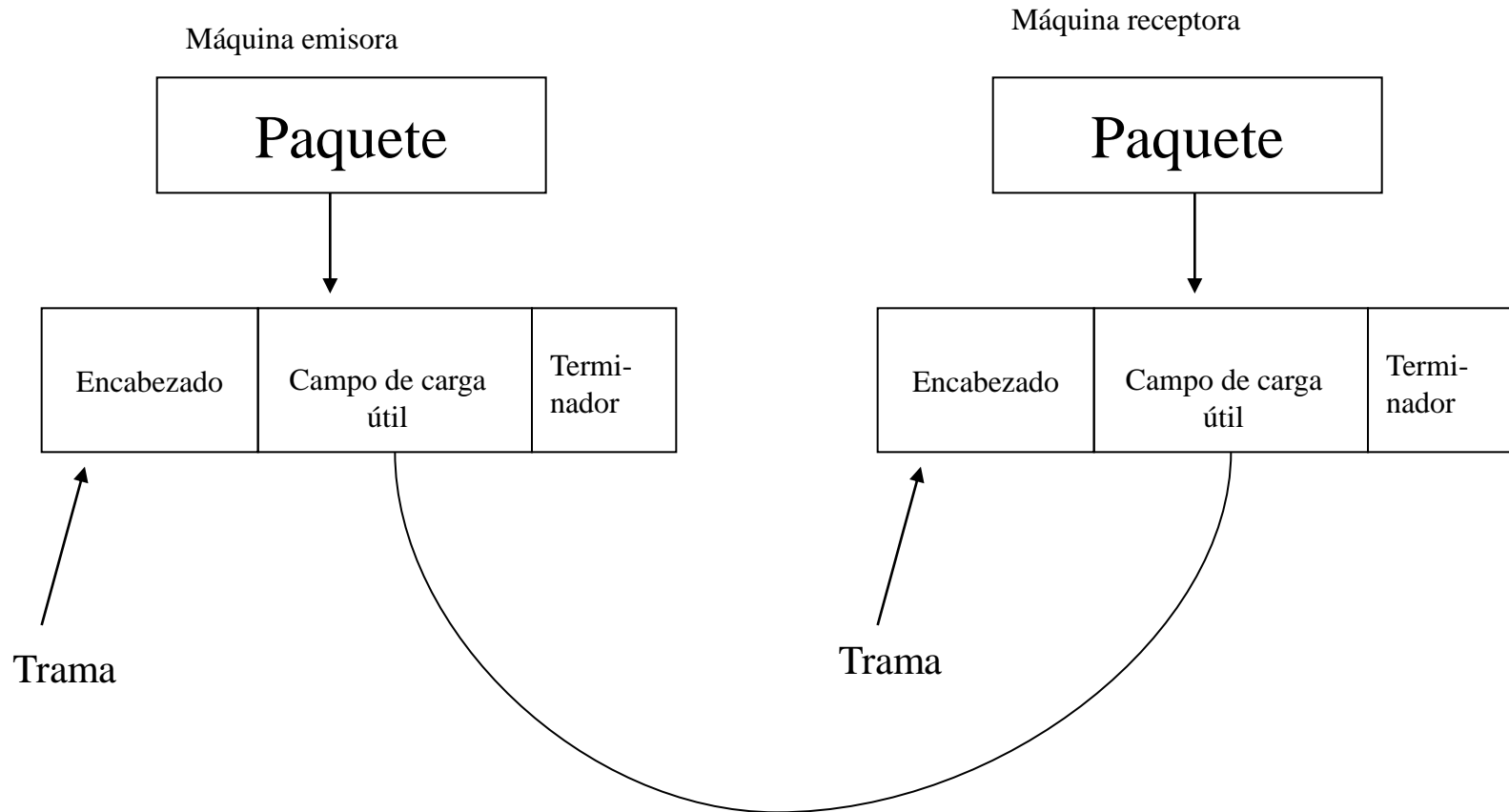
Driver del dispositivo de comunicaciones

Regula el flujo de datos

N=2



Relación entre los paquetes y las tramas



La capa de enlace en el contexto del modelo de capas

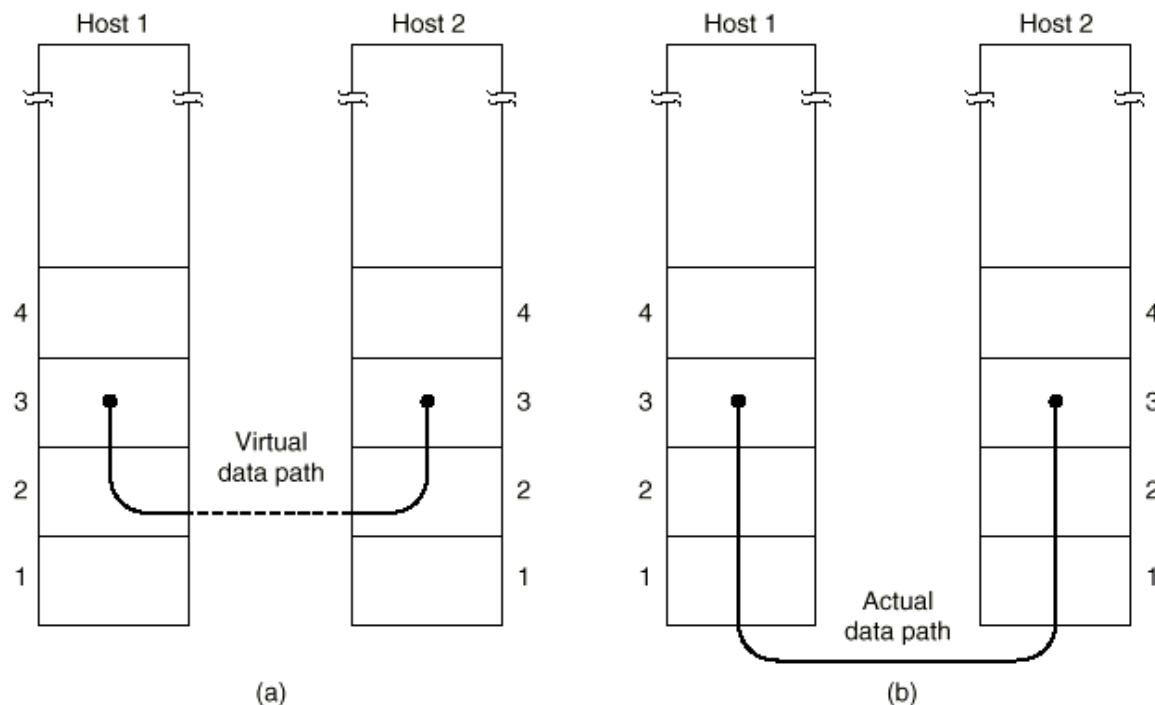


Fig. 3-1. (a) Virtual communication. (b) Actual communication.

Servicios de la capa de enlace

- Servicios no orientado a la conexión sin confirmación de recepción
- Servicio no orientado a la conexión con confirmación de recepción
- Servicio orientado a la conexión con confirmación de recepción.

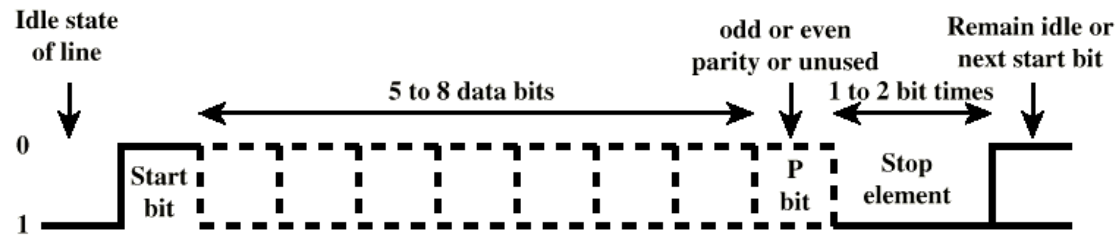
Funciones de la capa de enlace

- Obligatorias:
 - Identificar tramas (agrupación de bits que se intercambia a nivel de enlace)
 - Detección de errores
- Opcionales (servicio orientado a conexión):
 - Control de flujo
 - Corrección de errores

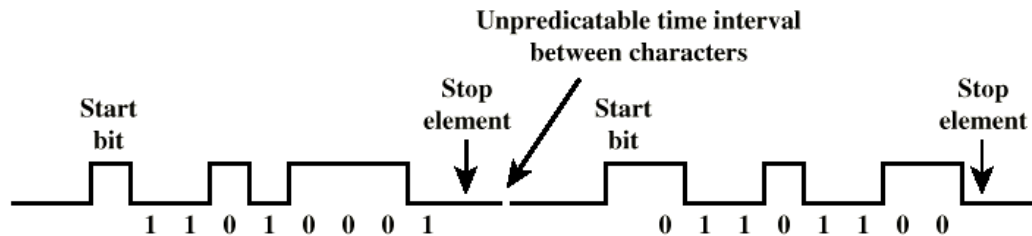
Tipo de transmisión

- Asíncrona: cada byte se envía de forma independiente. Cuando no hay datos que enviar la línea está en silencio
- Síncrona: la trama se envía sin separación entre los bytes. Cuando no hay nada que enviar el emisor envía una secuencia determinada de forma ininterrumpida para asegurar que no se pierde el sincronismo.

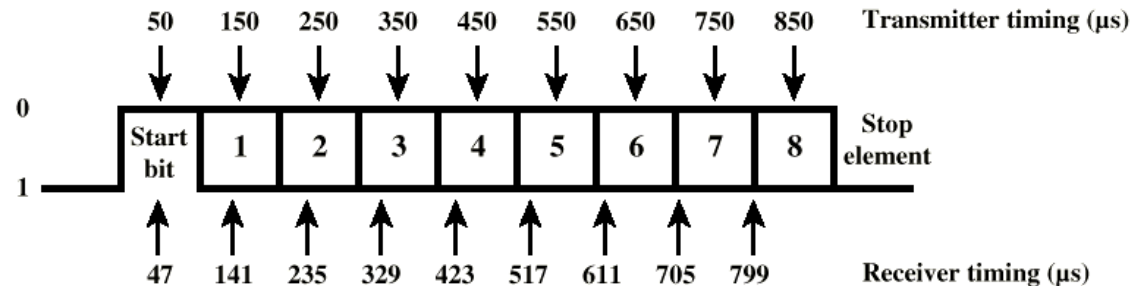
Características de la transmisión asíncrona



(a) Character format



(b) 8-bit asynchronous character stream



(c) Effect of timing error

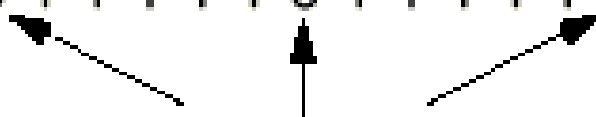
Figure 6.1 Asynchronous Transmission

Técnicas de identificación de tramas

- Contador de caracteres: posibles problemas por pérdida de sincronismo. No se utiliza en la actualidad
- Caracteres de inicio y final con caracteres de relleno: normalmente ASCII DLE STX para inicio y DLE ETX para final, con DLE de relleno.
- Secuencia de bits indicadora de inicio y final, con bits de relleno: normalmente 01111110; si en los datos aparecen cinco bits seguidos a 1 se intercala automáticamente un 0.
- Violaciones de código a nivel físico: se utiliza en algunas redes locales.

(a) 0 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 1 0

(b) 0 1 1 0 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 0 1 0 0 1 0



Stuffed bits

(c) 0 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 1 0

Fig. 3-5. Bit stuffing. (a) The original data. (b) The data as they appear on the line. (c) The data as they are stored in the receiver's memory after destuffing.

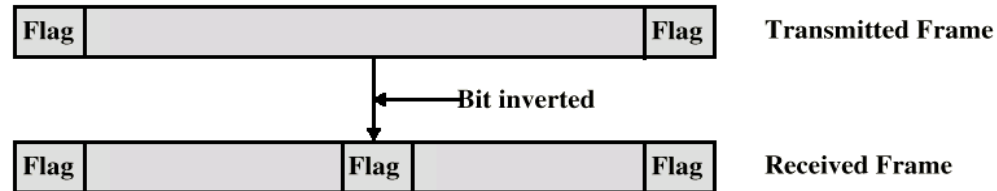
Original Pattern:

111111111111011111101111110

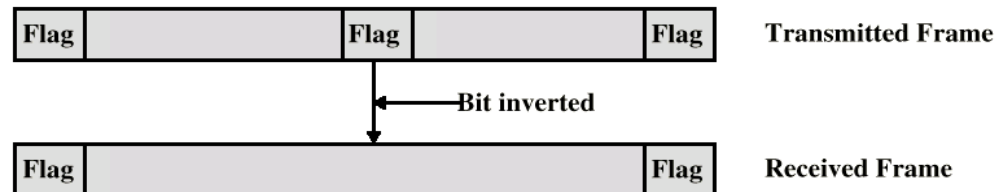
After bit-stuffing

1111101111101101111101011111010

(a) Example



(b) An inverted bit splits a frame in two



(c) An inverted bit merges two frames

Figure 7.11 Bit Stuffing

Control de flujo

- Necesario para no 'agobiar' al receptor.
- Se realiza normalmente a nivel de transporte, también a veces a nivel de enlace.
- Utiliza mecanismos de retroalimentación (el receptor advierte al emisor). Por tanto:
 - Requiere un canal semi-duplex o full-duplex
 - No se utiliza en emisiones multicast/broadcast
- Suele ir unido a la corrección de errores
- No debe limitar la eficiencia del canal.

Tasa de errores (BER)

- La tasa de errores de un medio de transmisión se mide por la BER (Bit Error Rate) que se define como:

$$\text{BER} = \text{bits erróneos} / \text{bits transmitidos}$$

- Un BER de 10^{-6} significa que hay un bit erróneo por cada millón de bits transmitidos

Valores de BER habituales

Medio físico	BER típico
Fibras ópticas	$< 10^{-12}$
LANs de cobre, Radioenlaces fijos (microondas)	$< 10^{-8}$
Enlaces telefónicos, satélite, ADSL, CATV	$< 10^{-5}$
GSM	$> 10^{-5}$

Códigos de control de errores

- Los códigos pueden ser:
 - **Detectores de errores:** p. ej. CRC (Cyclic Redundancy Check)
 - **Correctores de errores:** p. ej. RS (Reed-Solomon). Un RS con 10% de overhead puede mejorar el BER en 10^{-4} (p. ej. de 10^{-5} a 10^{-9})
- Los códigos detectores tienen menos overhead, pues necesitan incorporar menos redundancia.

Estrategias de control de errores

Tasa de error	Canal de comunicación	Estrategia
Baja o muy baja	Dúplex	Código detector sin reenvío de tramas erróneas (se hará, si acaso, a nivel de transporte)
Alta o muy alta	Dúplex	Código detector con reenvío de tramas erróneas
Alta o muy alta	Simplex (o emisión broadcast/multicast)	Código corrector (ej. RS)

		P_R	B_6	B_5	B_4	B_3	B_2	B_1	B_0		
<div>Bits de Paridad transversales</div>		0	0	0	0	0	0	1	0	STX	
		1	0	1	0	1	0	0	0	<div>Contenido de la trama</div>	
		0	1	0	0	0	1	1	0		
		0	0	1	0	0	0	0	0		
		1	0	1	0	1	1	0	1		
		0	1	0	0	0	0	0	0		
		1	1	1	0	0	0	1	1		
		1	0	0	0	0	0	1	1	ETX	
		1	1	0	0	0	0	0	0	1	<div>Bits de Paridad longitudinales</div>

Ejemplo de uso de Interleaving

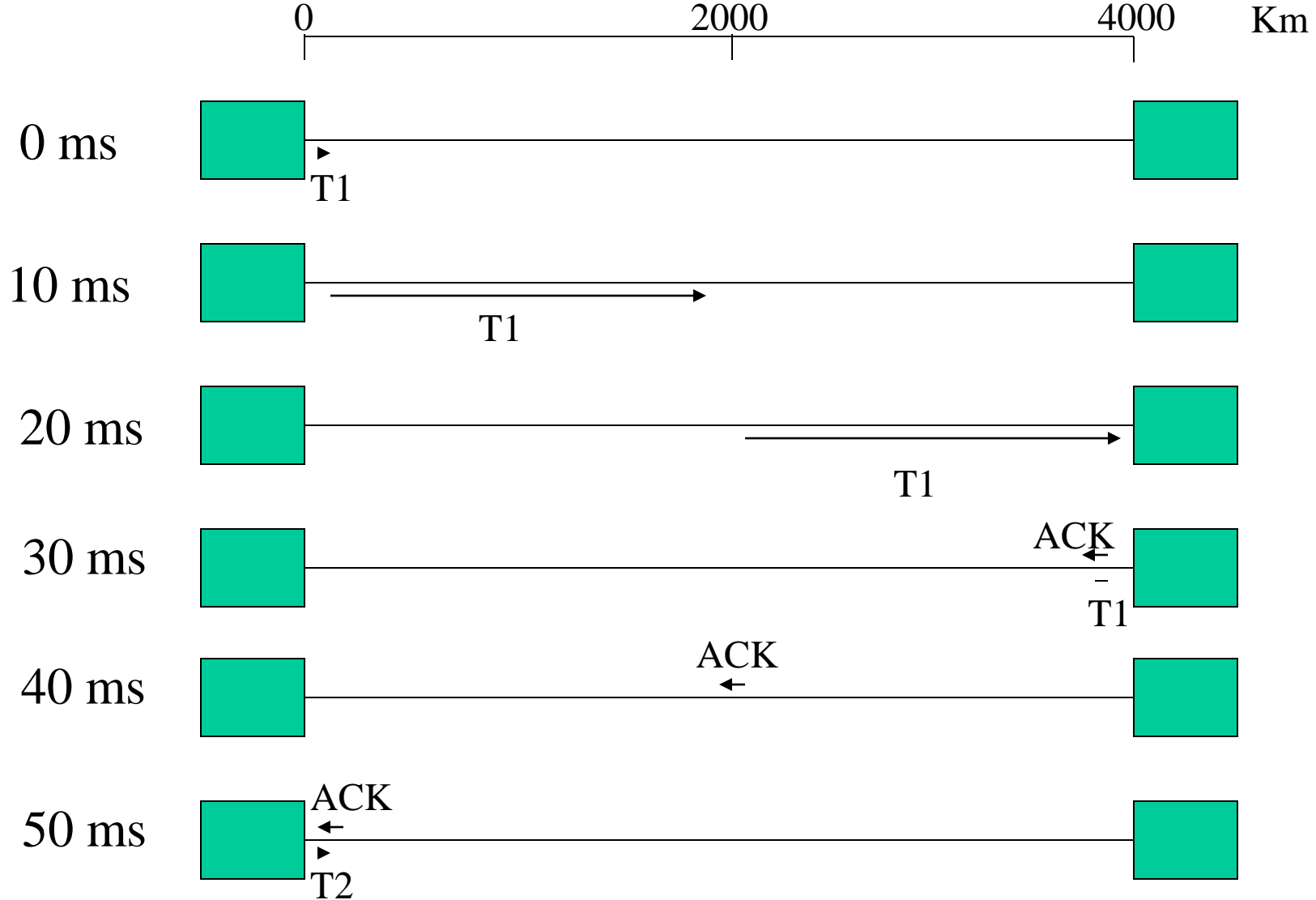
Sumario

- Funciones de la capa de enlace
- **Protocolos de parada/espera**
- Protocolos con ventana deslizante
- Protocolos de nivel de enlace: HDLC, PPP (Internet) y LAP-F (Frame Relay)
- Nivel de enlace en ATM

Protocolo de parada y espera

- Es el protocolo fiable orientado a conexión más sencillo
- Impide un uso eficiente de los enlaces, p. ej. Línea punto a punto de A a B de 64 Kb/s de 4000 Km de longitud, tramas de 640 bits:
 - 0 ms: A empieza el envío de trama T1
 - 10 ms: A termina envío de T1 y espera
 - 20 ms: B empieza recepción de T1
 - 30 ms: B termina recepción de T1; envía ACK de T1
 - 50 ms: A recibe ACK de T1; empieza envío de T2

Parada y espera



Protocolo simplex para un canal con ruido

- Consideramos un canal con ruido entonces:
 - Al protocolo anterior le sumamos un temporizador al momento del envío.
 - Si existe error, la trama de ack no se envía y al pasar el tiempo del temporizador se reenvia la trama original.
 - ¿Qué pasa si se pierde el ack?
 - Implementamos números de secuencia para cada paquete.

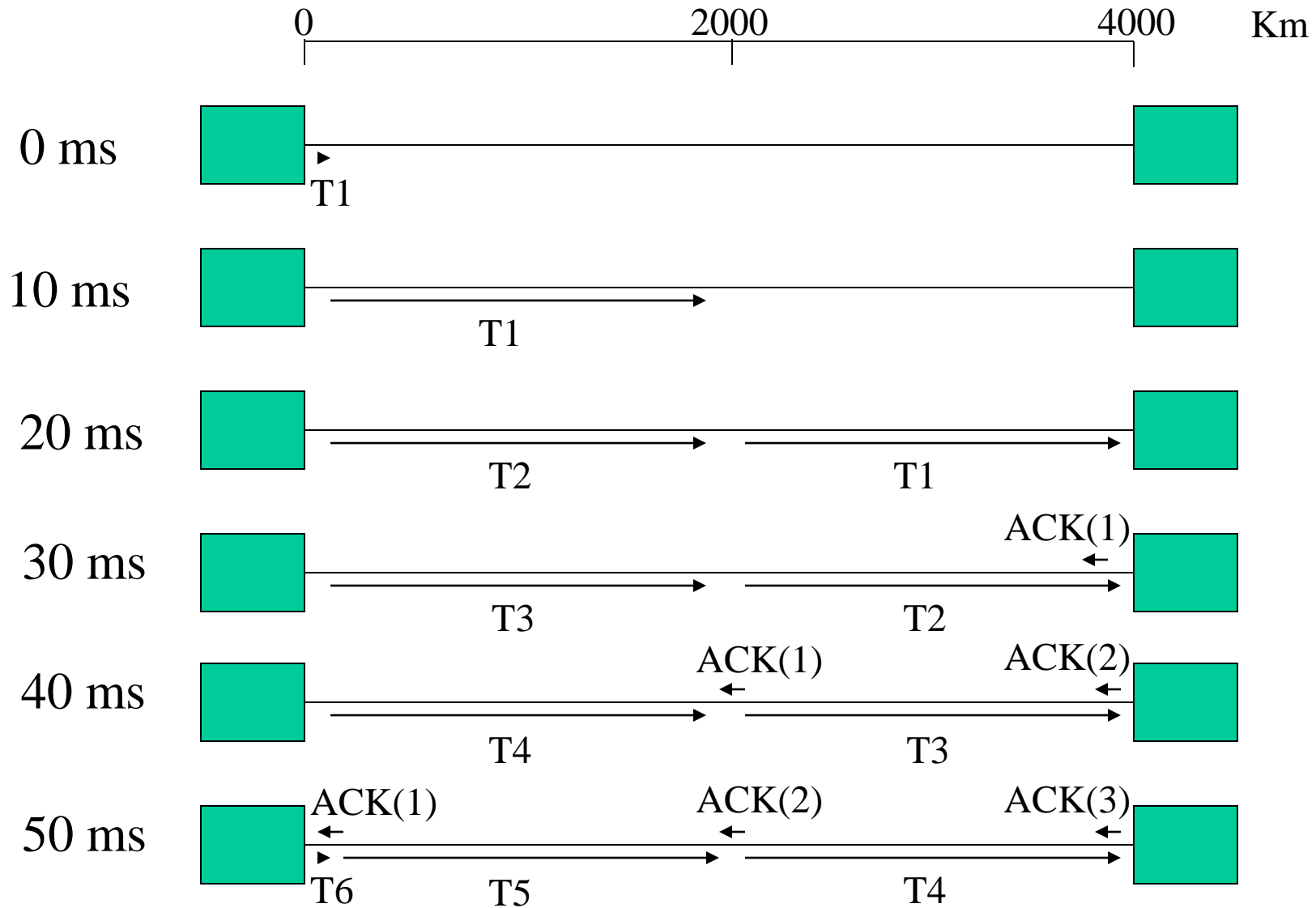
Sumario

- Funciones de la capa de enlace
- Protocolos de parada/espera
- **Protocolos con ventana deslizante**
- Protocolos de nivel de enlace: HDLC, PPP (Internet) y LAP-F (Frame Relay)
- Nivel de enlace en ATM

Protocolo de ventana deslizante

- Implementa un pipeline para evitar los tiempos muertos en la línea:
 - 0 ms: A envía T1
 - 10 ms: A envía T2;
 - 20 ms: A envía T3; B empieza a recibir T1
 - 30 ms: A envía T4; B envía ACK(T1)
 - 40 ms: A envía T5
 - 50 ms: A recibe ACK(T1) y envía T6
 - Ventana mínima para 100% de ocupación: 5
- Resuelve problema de eficiencia a cambio de mayor complejidad y espacio en buffers

Ventana deslizante



Tamaño de ventana

- La ventana mínima para 100% de ocupación es la que ‘llena el hilo’ de datos en ambos sentidos, mas uno:
- **$W = 2\tau * v/t + 1$**
 - W: tamaño de ventana
 - τ : tiempo de propagación
 - v: velocidad de la línea
 - t: tamaño de trama
 - **Ej.: $\tau=20\text{ms}$, $v = 64 \text{ Kb/s}$, $t = 640 \text{ bits} \rightarrow W = 5$**

Protocolos de ventana deslizante

- El protocolo puede ser:
 - **Retroceso n:** no se acepta una trama hasta haber recibido las anteriores
 - **Repetición selectiva:** se admite cualquier trama en el rango esperado y se pide solo la que falta.
- Repetición selectiva es más complejo pero más eficiente, y requiere mas espacio en buffers en el receptor.
- Tamaño de ventana:
 - Retroceso n: *Número de secuencia – 1*
 - Repetición selectiva: *Número de secuencia/2*

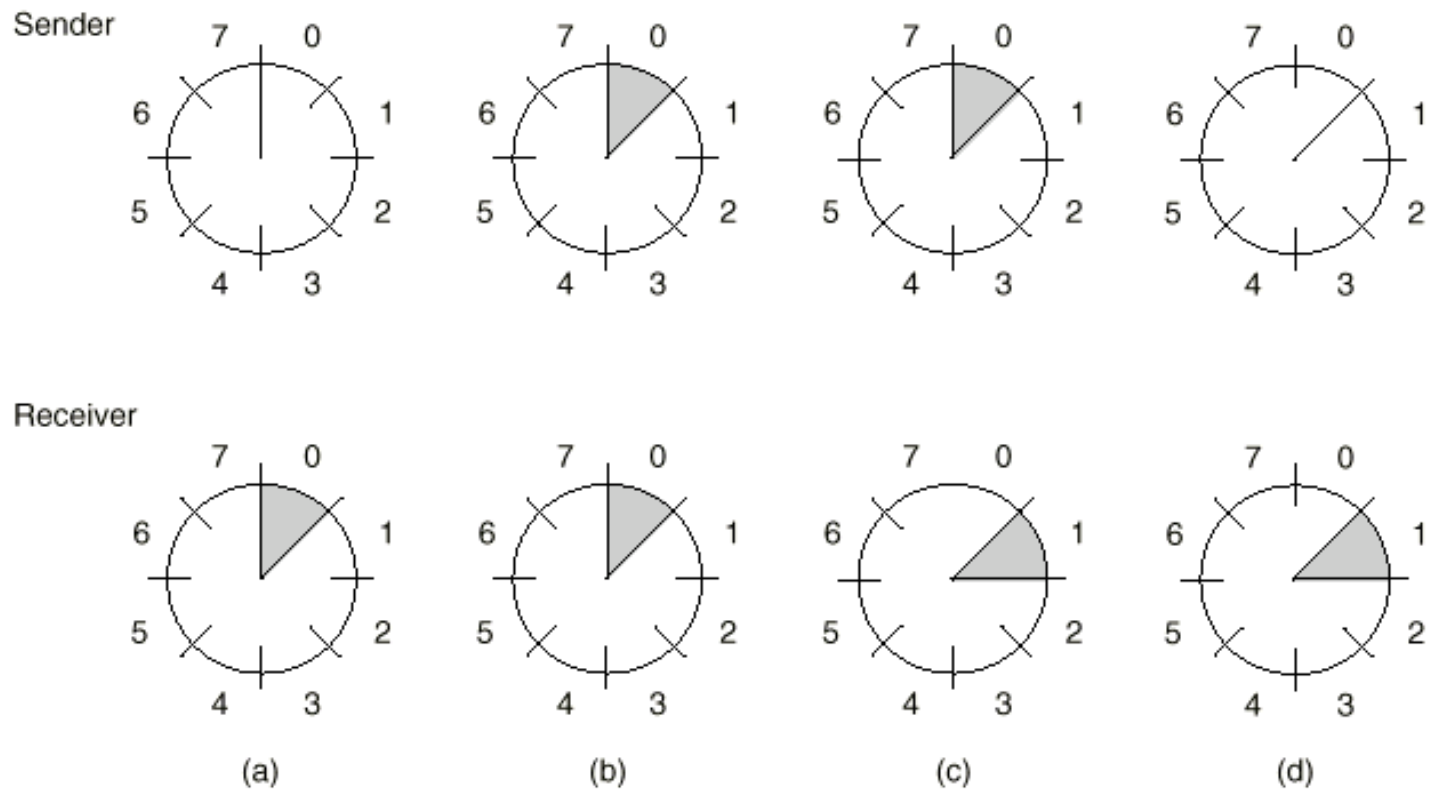
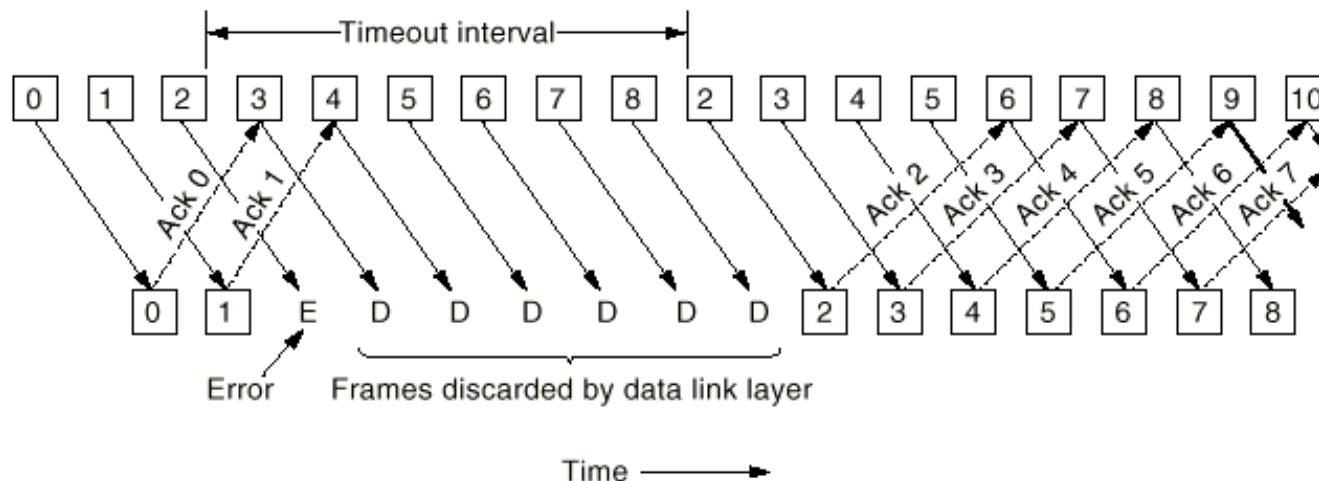
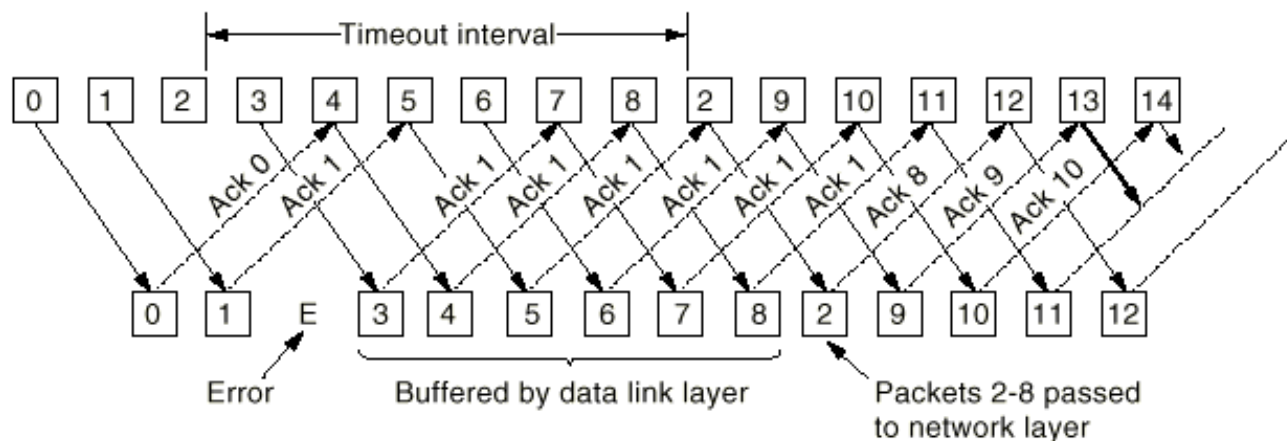


Fig. 3-12. A sliding window of size 1, with a 3-bit sequence number. (a) Initially. (b) After the first frame has been sent. (c) After the first frame has been received. (d) After the first acknowledgement has been received.



(a) Retroceso n



(b) Repetición selectiva

Fig. 3-15. (a) Effect of an error when the receiver window size is 1. (b) Effect of an error when the receiver window size is large.

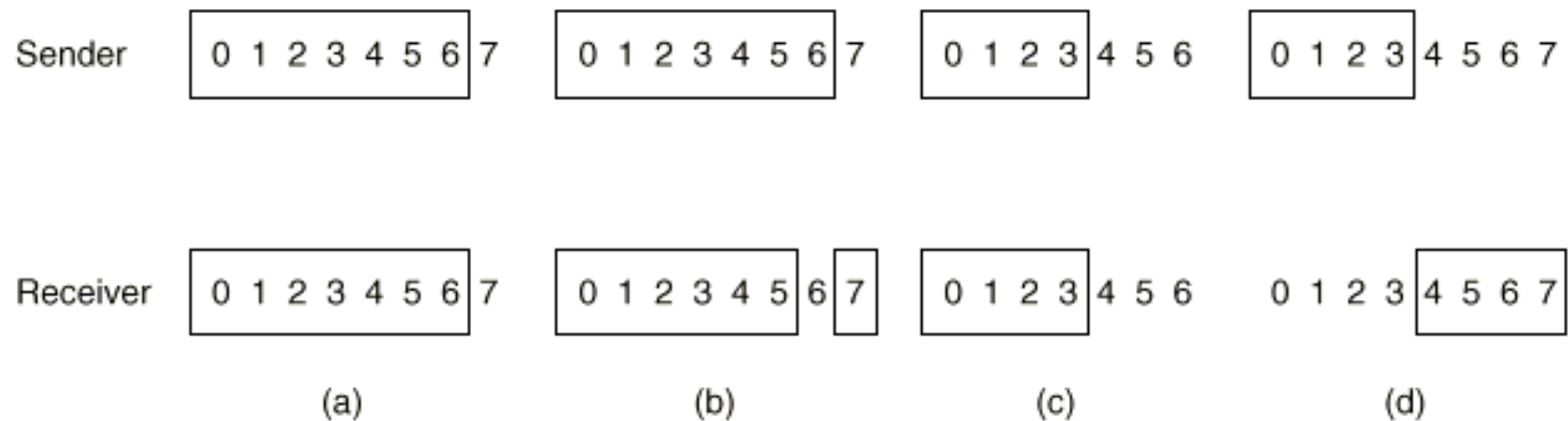


Fig. 3-19. (a) Initial situation with a window of size seven. (b) After seven frames have been sent and received but not acknowledged. (c) Initial situation with a window size of four. (d) After four frames have been sent and received but not acknowledged.

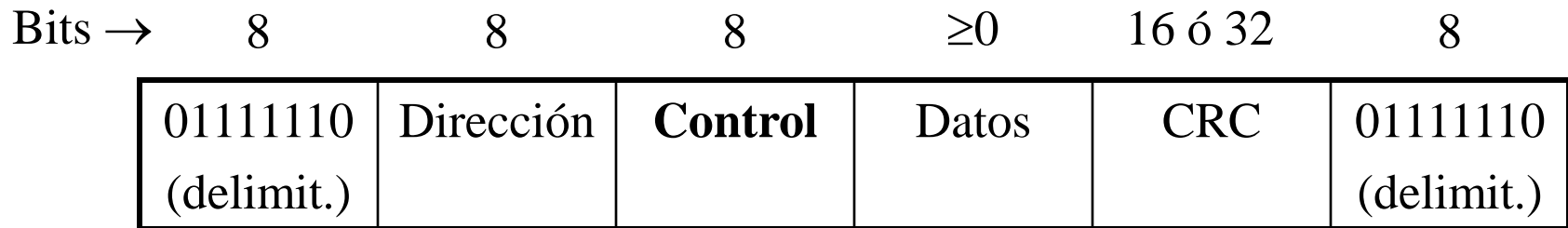
Sumario

- Funciones de la capa de enlace
- Protocolos de parada/espera
- Protocolos con ventana deslizante
- **Protocolos de nivel de enlace: HDLC, PPP (Internet) y LAP-F (Frame Relay)**
- Nivel de enlace en ATM

Familia de protocolos HDLC (High level Data Link Control)

- HDLC es un estándar ISO. Deriva del SDLC desarrollado por IBM en 1972
- Es un protocolo de ventana deslizante muy completo
- Prácticamente todos los protocolos de enlace actuales son subsets de HDLC:
 - PPP: Internet
 - LAP-B: X.25
 - LAP-F: Frame Relay
 - LLC (IEEE 802.2): redes locales
 - LAPM: módems RTC

Formato de trama HDLC



- Se utiliza relleno de bits
- El campo dirección siempre vale 11111111 (dirección broadcast) salvo en líneas multipunto.
- El campo control es el que realiza todas las tareas propias del protocolo
- El CRC es normalmente de 16 bits, pero puede ser de 32

Tipos de tramas HDLC

- Las tramas HDLC pueden ser de tres tipos según el valor de los primeros bits del campo control:

De información	1		3		1		3	
	0		SEQ		P/F		NEXT	
De supervisión	2		2		1		3	
	1	0		ORDEN		P/F		NEXT
No numerada	2		2		1		3	
	1	1		ORDEN 1/2		P/F		ORDEN 2/2

P/F: Polling/Final (solo utilizado en líneas multipunto)

Comandos en tramas de supervisión HDLC

Orden	Comando	Significado
00	RECEIVE READY	ACK cuando no hay tráfico de vuelta para piggybacking
10	RECEIVE NOT READY	Recepción correcta pero pide suspender transmisión (control de flujo)
01	REJECT	Acuse de recibo negativo (NAK). Pide reenvío cuando se usa retroceso n
11	SELECTIVE REJECT	Petición de reenvío cuando se usa retransmisión selectiva

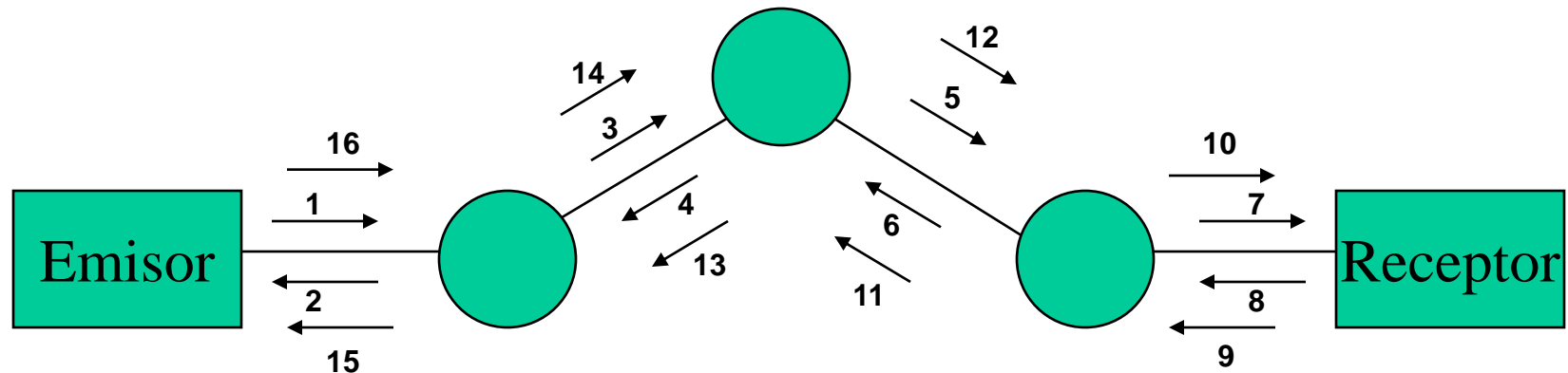
Elaboración de tramas HDLC

- En el emisor:
 1. Concatenar campos dirección, control y datos
 2. Calcular el CRC de la cadena resultante
 3. Realizar el relleno de bits poniendo un bit a cero siempre que en la cadena a enviar aparezcan cinco unos seguidos
 4. Añadir a la trama los delimitadores de inicio y final (01111110). Si se envían dos tramas seguidas el delimitador de final de una sirve como inicio de la siguiente
- El receptor procede de manera inversa (4,3,2,1)

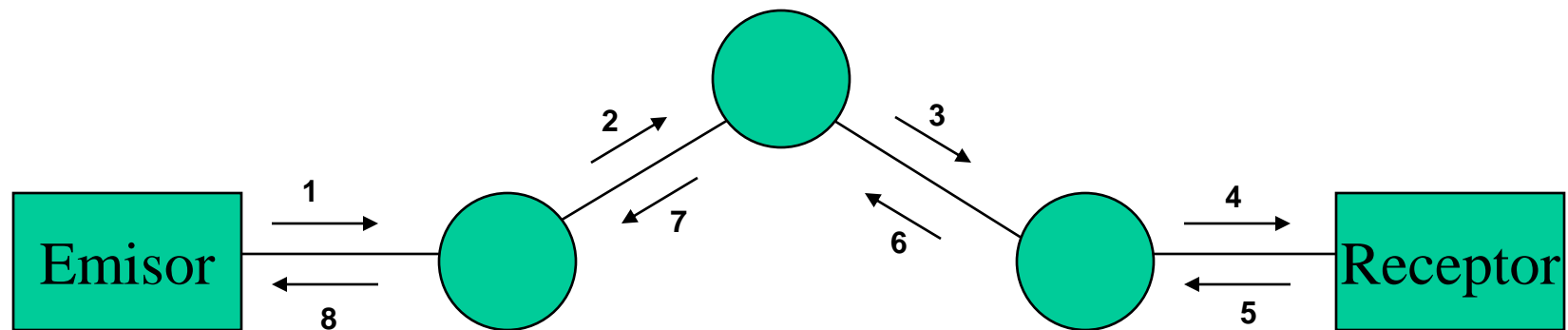
Funcionamiento de HDLC

- ¿Que pasa si en la transmisión desaparecen los dos últimos bytes (el CRC) de una trama?
- ¿Que pasa si una trama se altera y aparece en ella la secuencia ‘01111110’?
- ¿Que pasa si el flujo de datos se altera y desaparece un delimitador entre dos tramas?

Comunicación TCP sobre X.25 y Frame Relay



X.25



Frame Relay

Nivel de enlace en Internet

- El protocolo IP está diseñado para funcionar sobre casi cualquier medio físico ('IP over everything'):

Medio	RFC	Año
X.25	877, 1356	1983
Ethernet	894	1984
802.x	1042	1988
FDDI	1188, 1390	1990
PPP	1171, 1663	1990
Frame Relay	1490	1993
ATM	1483, 1577	1994

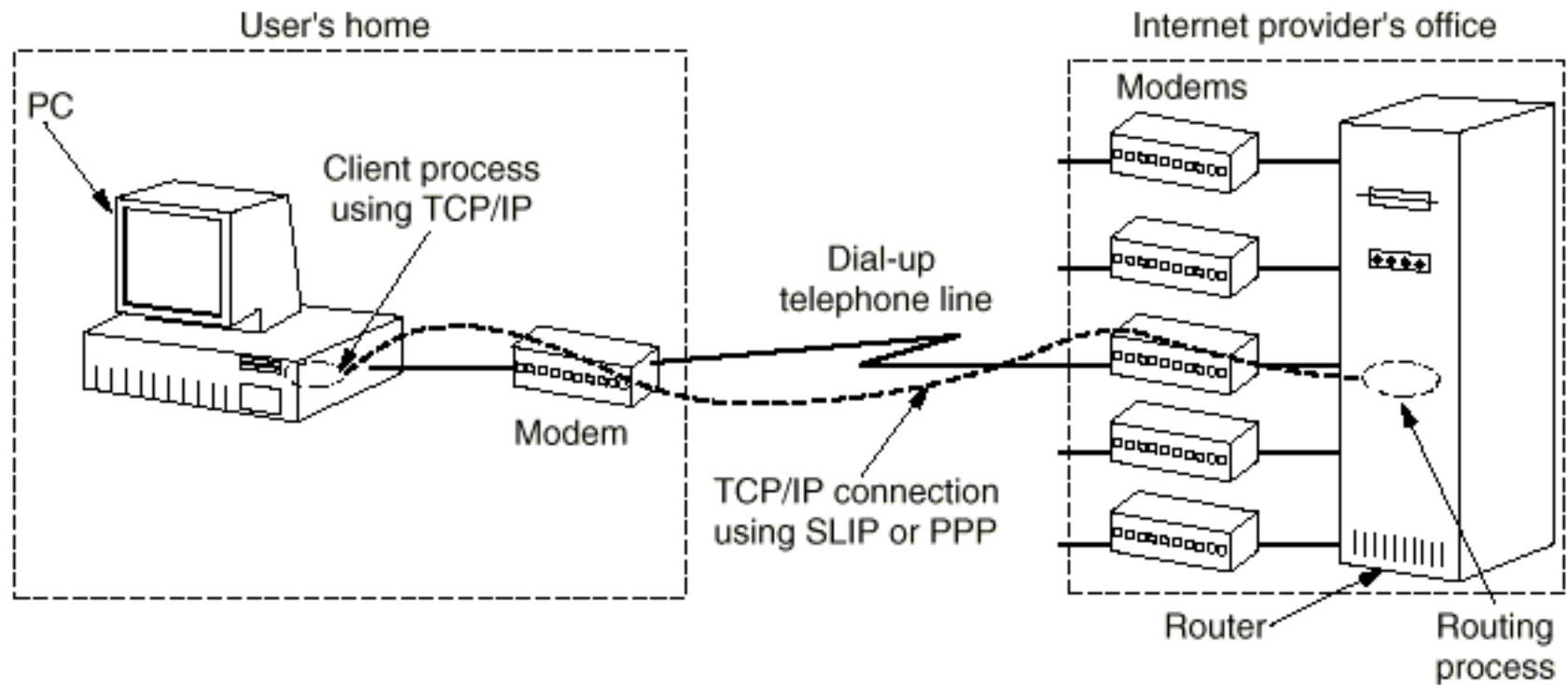


Fig. 3-26. A home personal computer acting as an Internet host.

PPP (Point to Point Protocol)

RFC1663

- El protocolo de enlace 'característico' de Internet es el PPP, que se utiliza en:
 - Líneas dedicadas punto a punto
 - Conexiones RTC analógicas o digitales (RDSI)
 - Conexiones de alta velocidad sobre enlaces SONET/SDH
- Puede funcionar de forma síncrona o asíncrona (puerto COM de un PC)
- Es multiprotocolo, una comunicación soporta simultáneamente varios protocolos a nivel de red.

PPP características

- Un método de entramado que delinea sin ambigüedades el final de una trama y el inicio de la siguiente.
- Un protocolo de control de enlace para activar líneas, probarlas, negociar opciones y desactivarlas ordenadamente cuando ya no son necesarias. Este protocolo se llama LCP
- Un mecanismo para negociar opciones de capa de red con independencia del protocolo de red usado. El método consiste en tener un NCP (Protocolo de control de Red) distinto para cada protocolo de capa de red soportado.

Formato de trama PPP

- Utiliza estructura tipo HDLC:

Bytes → 1 1 1 1 ó 2 Variable 2 ó 4 1

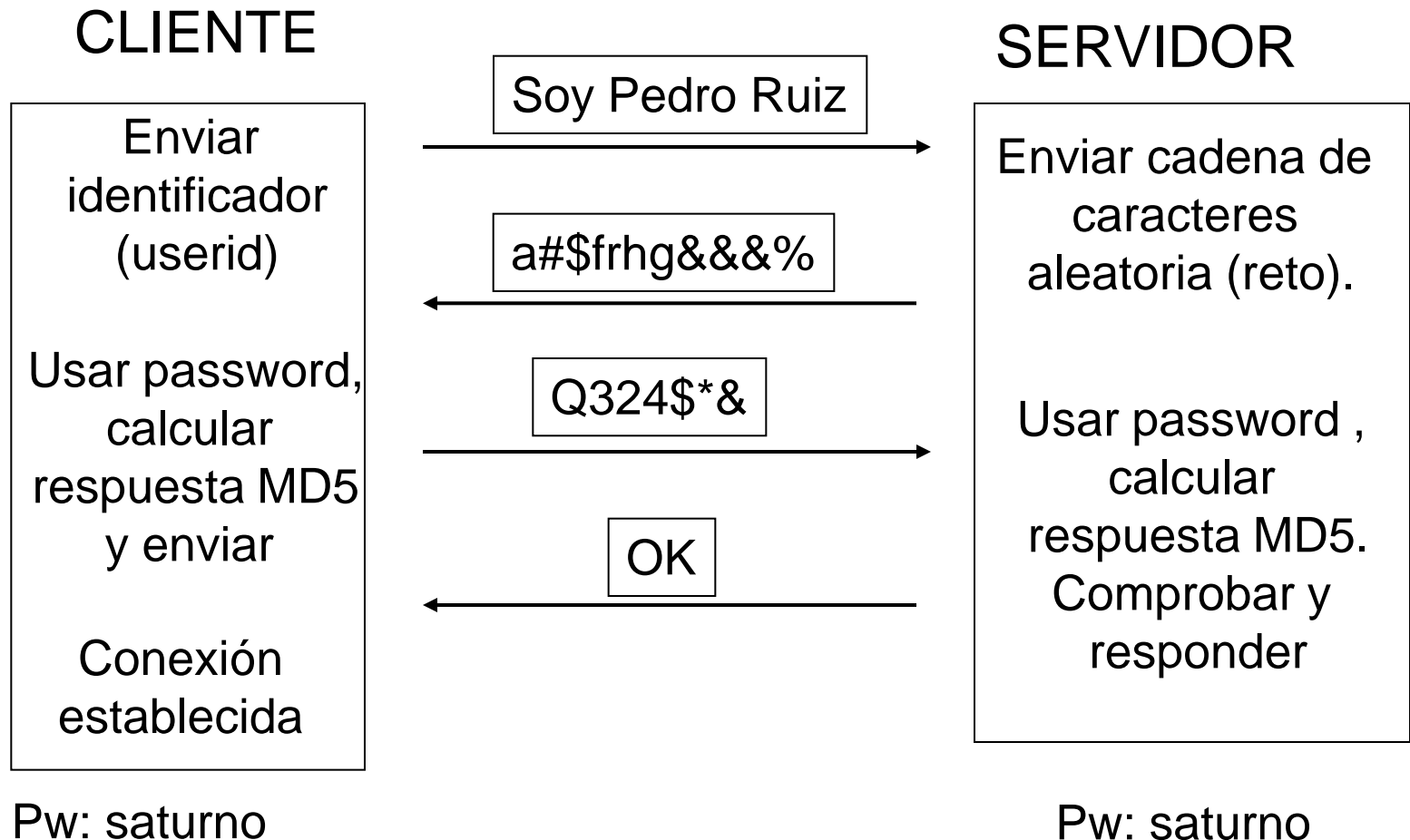
Delimitad. 01111110	Dirección 11111111	Control 00000011	Protocolo	Datos	CRC	Delimitad. 01111110
------------------------	-----------------------	---------------------	-----------	-------	-----	------------------------

- La trama siempre tiene un número entero de bytes
- El campo dirección no se utiliza, siempre vale 11111111
- El campo control casi siempre vale 00000011, que especifica trama no numerada (funcionamiento sin ACK).
- Generalmente en el inicio se negocia omitir los campos dirección y control (compresión de cabeceras)

Componentes de PPP

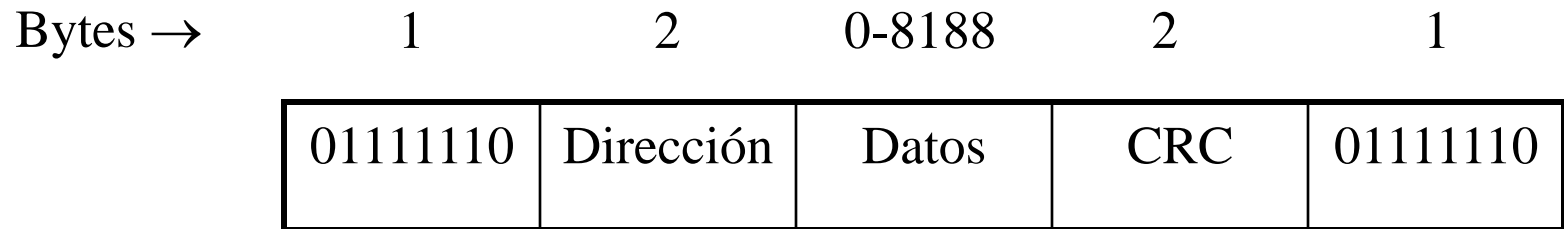
- LCP (Link Control Protocol): negocia parámetros del nivel de enlace en el inicio de la conexión, Ej.:
 - Supresión de campos dirección y control
 - Uso de protocolos fiables (con ACK)
- NCP (Network Control Protocol): negocia parámetros del nivel de red:
 - Protocolos soportados (IP, IPX, OSI, CLNP, XNS)
 - Asignación dinámica de dirección IP.
- CHAP (Challenge Handshake Authentication Protocol): realiza tarea de autenticación de usuario.

Funcionamiento de CHAP (Challenge Handshake Protocol)



Nivel de enlace en Frame Relay

Estructura de trama:



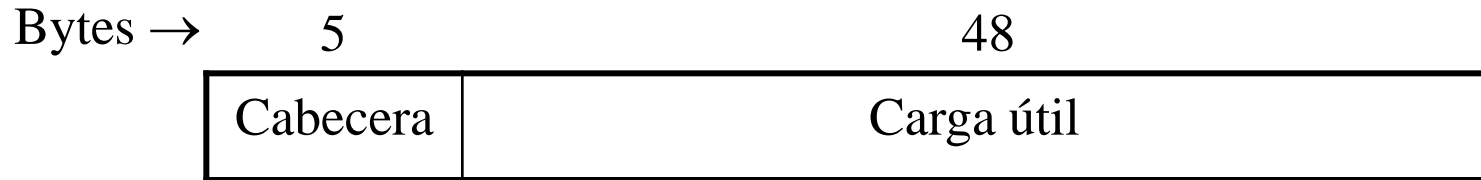
- No se realiza reenvío en caso de error
- El campo dirección contiene la información del circuito virtual y los parámetros propios de las funciones de Frame Relay; su estudio corresponde al nivel de red.

Sumario

- Funciones de la capa de enlace
- Protocolos de parada/espera
- Protocolos con ventana deslizante
- Protocolos de nivel de enlace: HDLC, PPP (Internet) y LAP-F (Frame Relay)
- **Nivel de enlace en ATM**

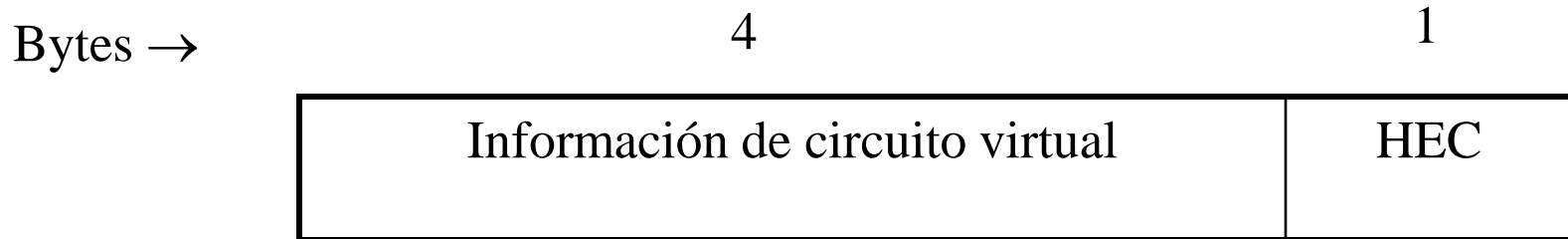
Nivel de enlace en ATM

- Corresponde a la subcapa TC (Transmission Convergence) de la capa física del modelo ATM
- Estructura de una celda ATM:



El tamaño (48 bytes) fue elegido por la ITU como compromiso entre la postura de las PTT europeas (16-32 bytes) y los fabricantes de ordenadores (128-64 Bytes)

Estructura de la cabecera de celda ATM



El HEC (Header Error Control) es un CRC de los primeros 4 bytes. Se utiliza para comprobar la validez de la información de cabecera que se considera crítica.

ATM no incorpora un CRC de la carga útil. Lo hará, si procede, el protocolo de transporte (AAL).

Identificación de celdas ATM

- Las celdas no llevan un delimitador. Para averiguar donde empiezan se usan dos técnicas:
 1. Características del medio físico. Por ejemplo en SONET/SDH la información de control de línea contiene un puntero que indica el principio de una celda ATM en la trama
 2. Tanteo del HEC: se busca en el flujo de bits recibido una secuencia de 40 bits en la que los ocho últimos sean el HEC de los 32 primeros. Cuando se encuentra uno válido se confirma en las cuatro celdas siguientes

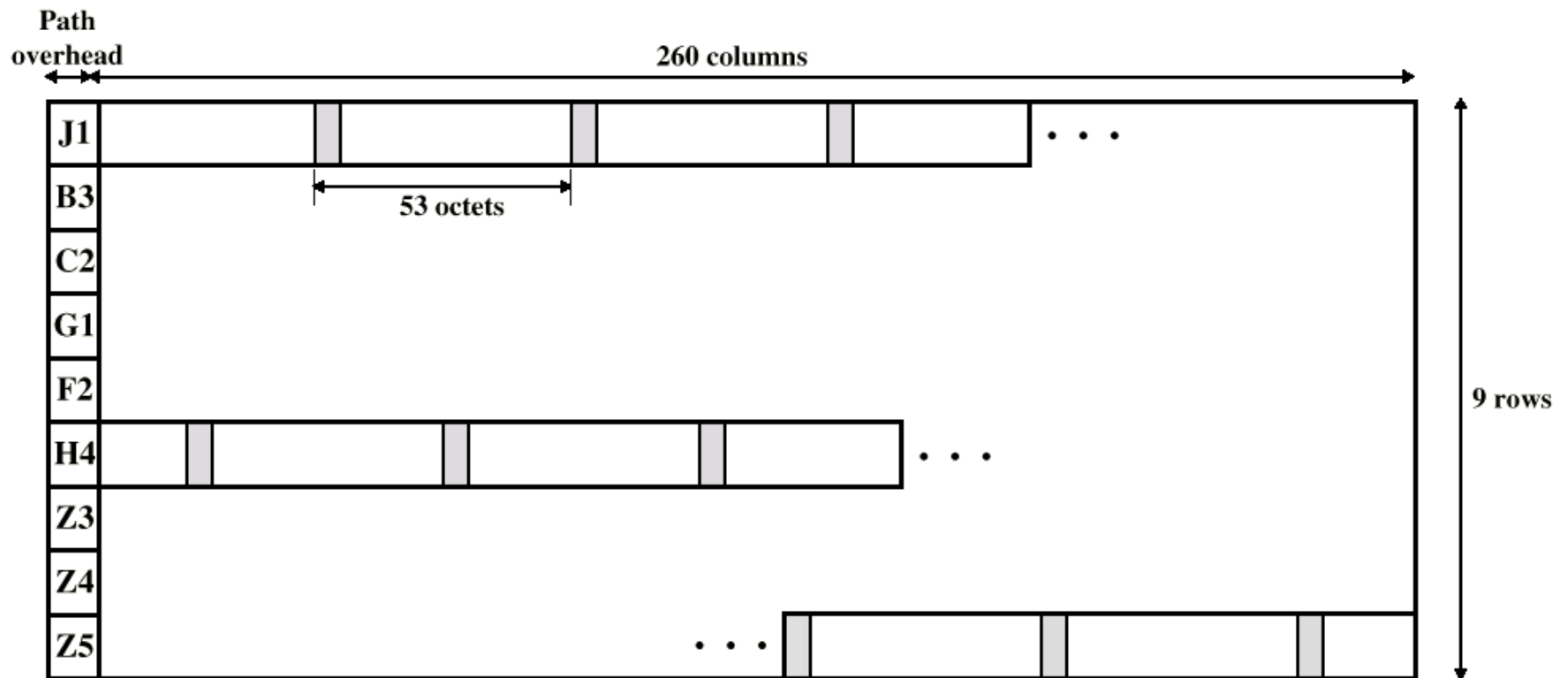


Figure 11.11 STM-1 Payload for SDH-Based ATM Cell Transmission

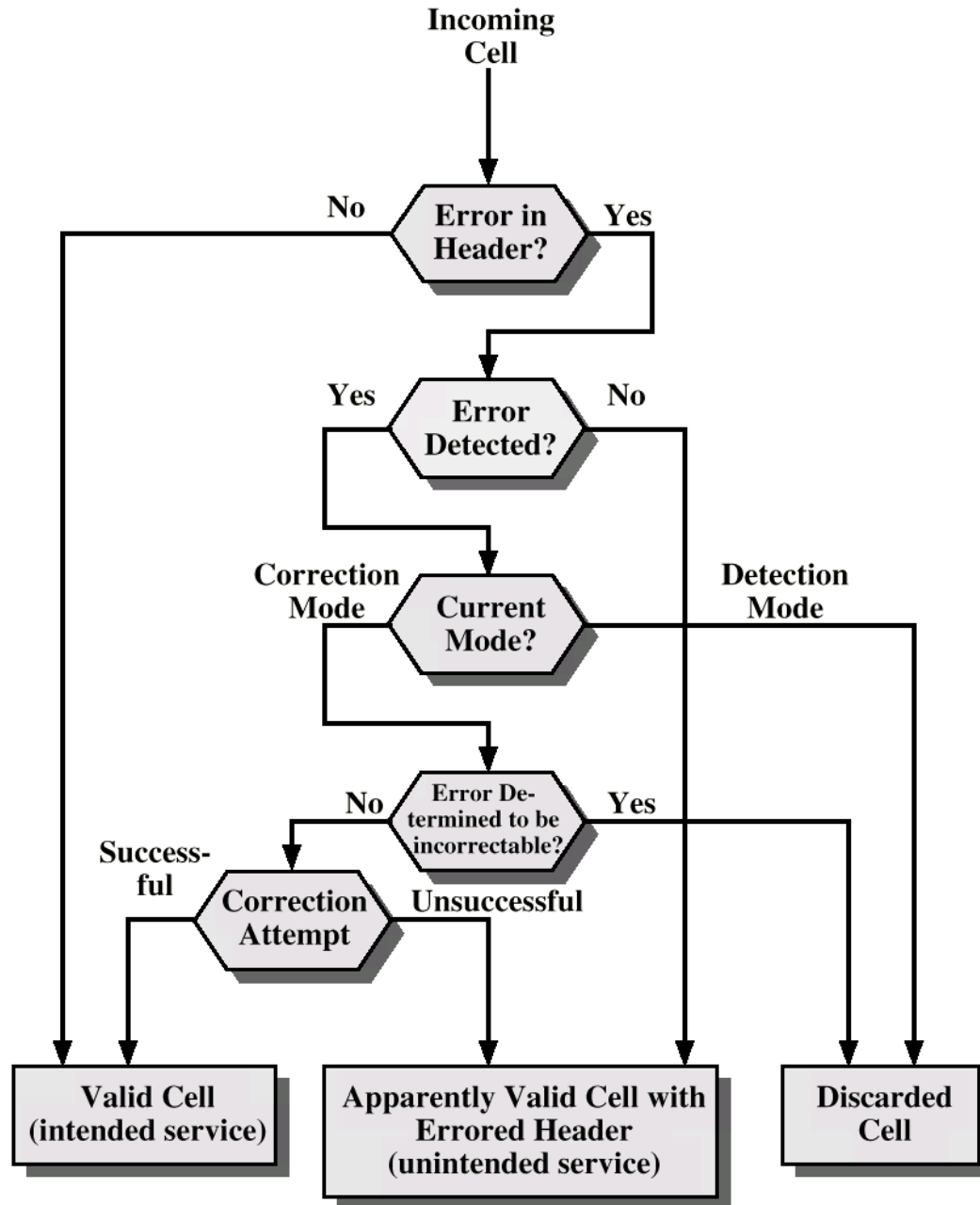


Figure 11.6 Effect of Error in Cell Header

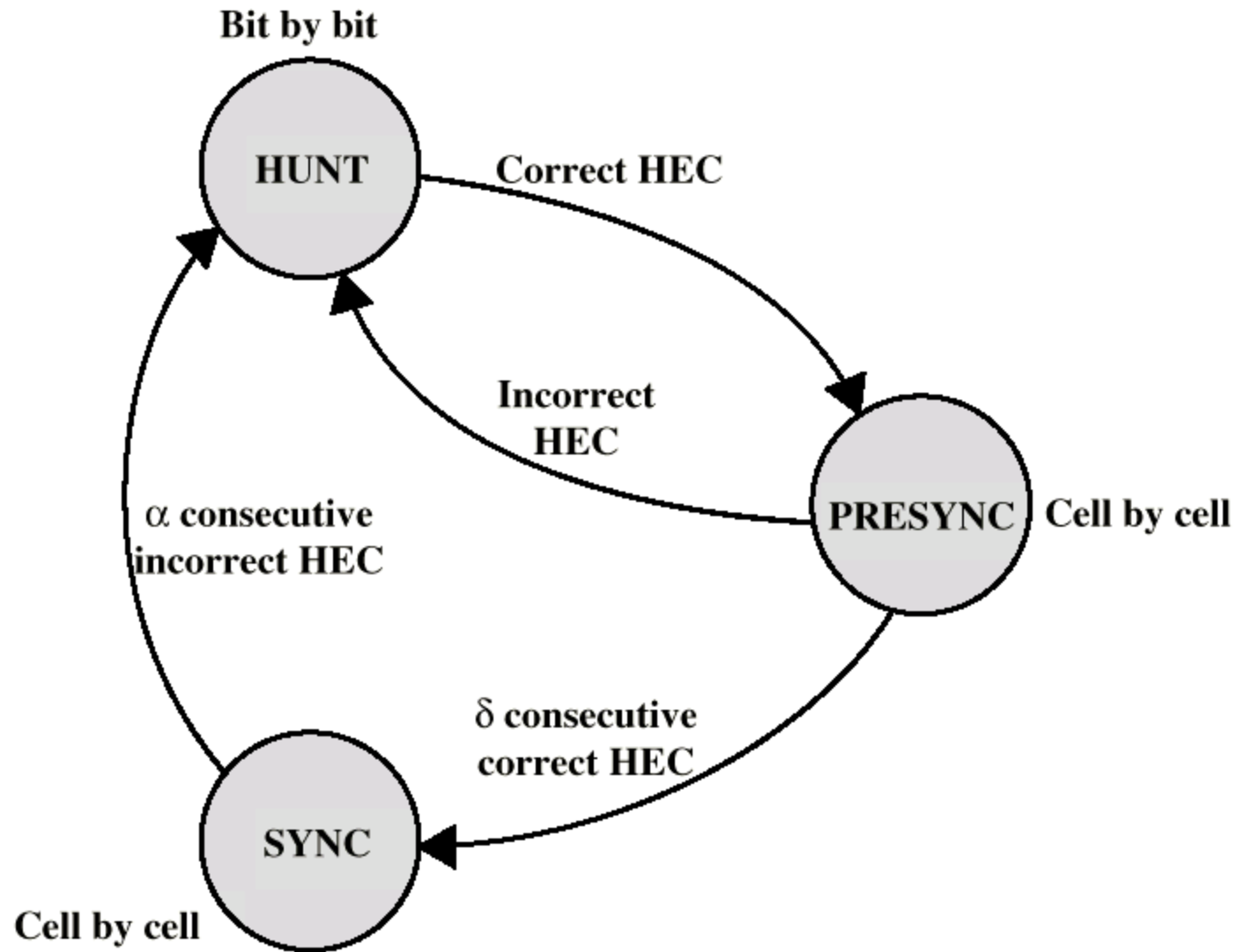


Figure 11.8 Cell Delineation State Diagram

Ejercicios

Ejercicio 3

- Se ha de transmitir con protocolo HDLC la cadena de bits:
01101111 01111101 1111100
- Diga que cadena se transmite realmente. ¿Supone algún problema que la longitud de ésta no sea múltiplo de 8?
- Cadena a transmitir:
01101111 01111100 11111010 0
- El que no sea múltiplo de 8 no supone problema porque HDLC es un protocolo orientado al bit

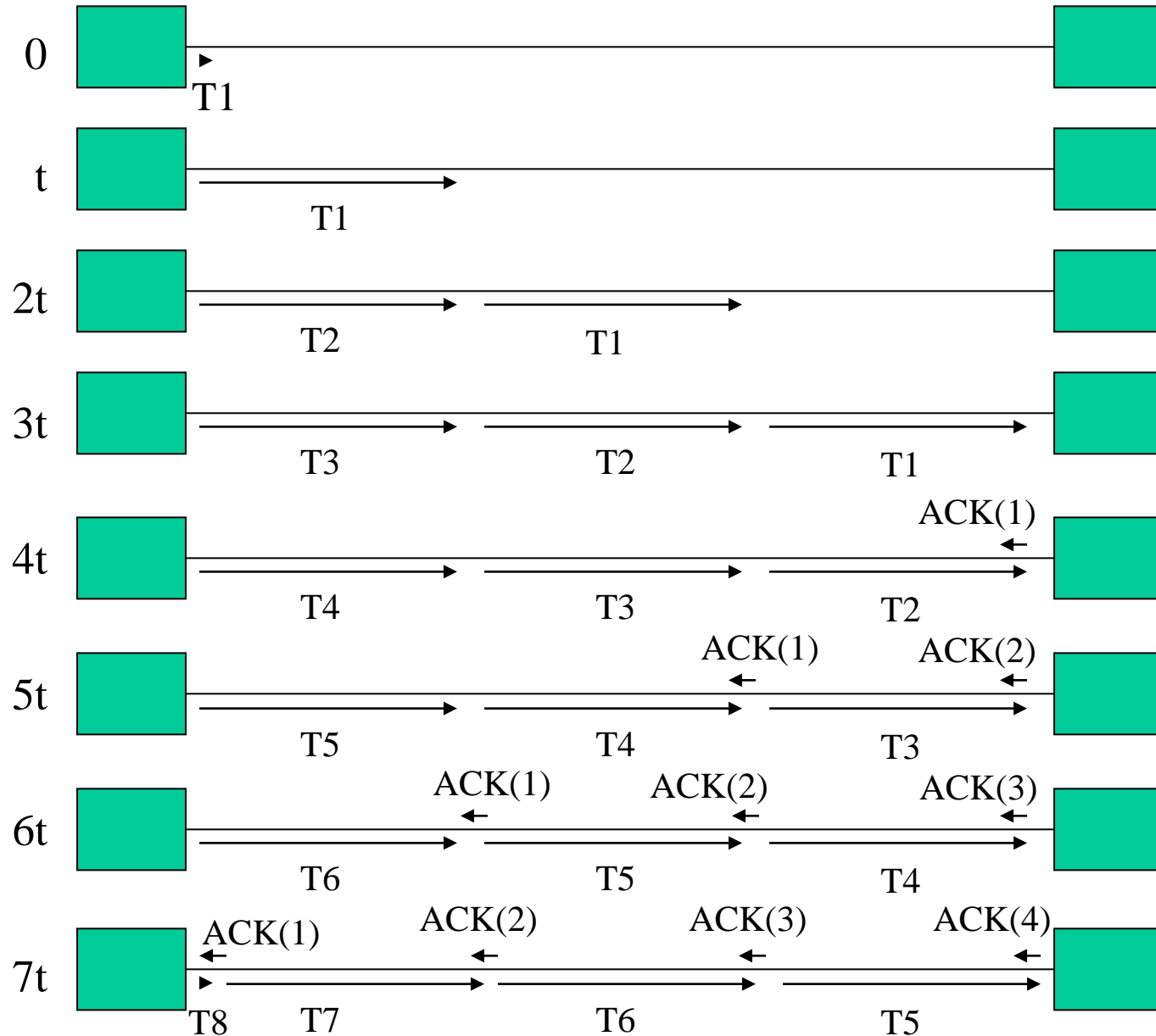
Ejercicio 3-6

- Enlace E1 (2.048 Kb/s)
- F.O. (200.000 Km/s)
- HDLC normal \rightarrow No. Sec. 3 bits (8 valores)
- Protocolo retroceso n \rightarrow ventana tamaño 7
- Tramas de 1 Kbyte
- Calcular distancia máxima para conseguir 100% de ocupación
- Tiempos de generación de tramas y ACKs despreciables

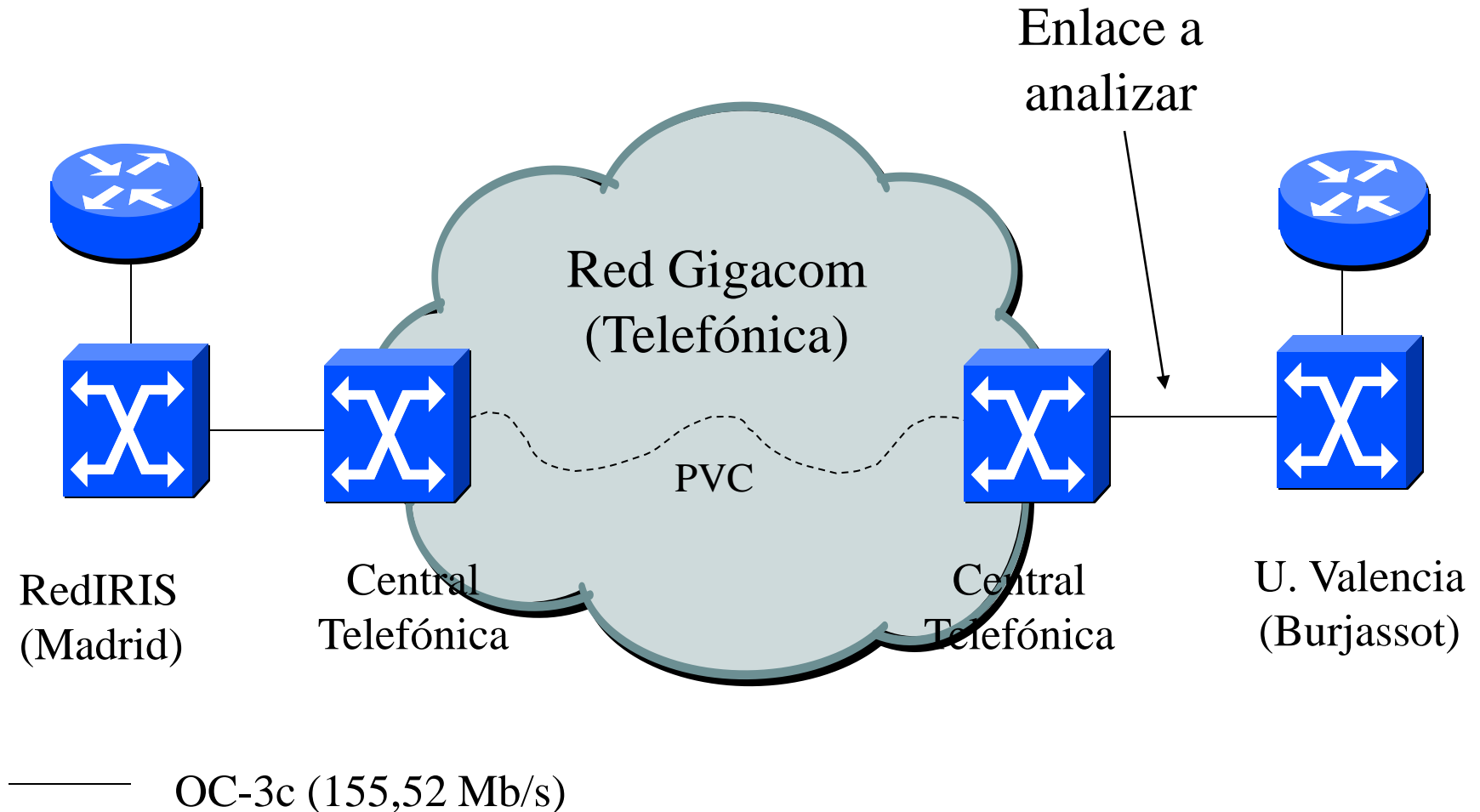
Ejercicio 3-6

- Para 100% ocupación hay que tener tramas para ‘llenar el hilo’ en ambos sentidos mas una. Esto equivale a meter en cada sentido tres tramas ($3 + 3 + 1 = 7$).
- Una trama de 1 KB en una línea E1 tarda:
 $1.024 * 8 / 2.048.000 = 0,004 \text{ s} = 4 \text{ ms}$
Tres tramas $4 \times 3 = 12 \text{ ms}$. En ese tiempo la señal recorre:
 $0,012 \text{ s} * 200.000 \text{ Km/s} = \mathbf{2400 \text{ Km}}$

Numseq 8 ventana 7 (retroceso n)



Ejercicio 3-7



Ejercicio 3-7

- Calcular:
 - La BER (Bit Error Rate) del enlace físico OC-3 entre la central telefónica y el conmutador ATM
 - El número medio de celdas por hora que entran en la Comunidad Valenciana con un valor erróneo en el campo payload sin ser detectadas

Ejercicio 3-7

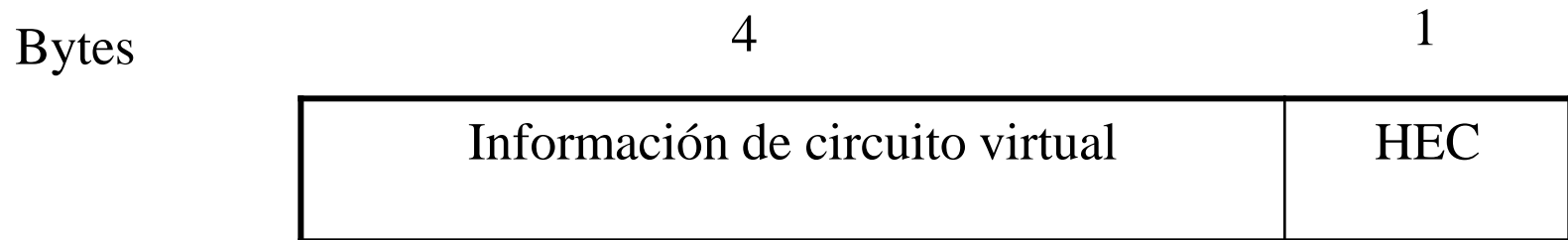
Tasa de error en enlace ATM

SHOW INTERFACE ATM0/1/2

```
ATM0/1/2 is up, line protocol is up
Hardware is oc3suni
Description: Linea de acceso con RedIRIS (Servicio GIGACOM)
MTU 4470 bytes, sub MTU 0, BW 156250 Kbit, DLY 0 usec, rely 255/255, lo
Encapsulation ATM, loopback not set, keepalive not set
Last input 00:00:00, output 00:00:00, output hang never
Last clearing of "show interface" counters 4h
Queueing strategy: fifo
Output queue 0/40, 0 drops; input queue 0/75, 0 drops
1 minute input rate 3131000 bits/sec, 7381 packets/sec
1 minute output rate 748000 bits/sec, 1768 packets/sec
59253444 packets input, 3140432510 bytes, 0 no buffer
Received 0 broadcasts, 0 runts, 0 giants
22 input errors, 23 CRC, 0 frame, 0 overrun, 0 ignored, 0 abort
45065854 packets output, 2388490236 bytes, 0 underruns
0 output errors, 0 collisions, 0 interface resets
0 output buffer failures, 0 output buffers swapped out
```

Ejercicio 3-7

- El único CRC de las celdas ATM es el HEC de la cabecera:



Se han detectado 23 cabecras erróneas en 59253444 celdas. La tasa de cabeceras erróneas es:

$$23/59253444 = 3,9 \times 10^{-7}$$

La tasa de bits erróneos (BER) será 40 veces menor:

$$3,9 \times 10^{-7} / 40 = 9,7 \times 10^{-9} \cong \mathbf{10^{-8}}$$

Ejercicio 3-7

- Celdas que entran por hora:
 $59253444 / 4 = 14,813 \times 10^6$
- El payload (carga útil) no contiene CRC. Por tanto todas las celdas que tengan algún error en el payload pasarán desapercibidas
- Con una BER de 10^{-8} la tasa de celdas con el payload erróneo es $48 \times 8 = 384$ veces el BER:
 $14,813 \times 10^6 \times 10^{-8} \times 384 = \mathbf{57 \text{ celdas por hora}}$

Ejercicio 3-8

- Fichero de 1 Mbyte con el carácter decimal 80 (ASCII 'P').
- Línea de 64 Kb/s, tramas HDLC, 250 bytes cada una (2000 bits).
- Calcular tramas y bits transmitidos y tiempo de transmisión.
- Lo mismo para el carácter 231 (decimal)
- Lo mismo para código EBCDIC

Ejercicio 3-8

Número de Tramas:

$$1 \text{ Mbyte} = 1024 * 1024 * 8 = 8.388.608 \text{ bits}$$

$$\text{Tramas: } 8388608/2000 = 4194,3 = \mathbf{4195 \text{ tramas}}$$

(4194 con 2000 bits y una con 608 bits)

Caracteres:

$$\text{Decimal } 80 = 1010000 \text{ (binario)}$$

Secuencia de datos: 0101000001010000101000....

No es preciso el relleno de bits

Ejercicio 3-8

Bits	8	8	8	≥ 0	16	8
	01111110	Dirección	Control	Datos	CRC	01111110

El delimitador final de una trama puede ser el de principio de la siguiente.

Bits transmitidos:

Info. de control ($40 * 4195$):	167800
Delimitador final:	8
Datos:	8388608
TOTAL:	8556416 bits

Tiempo: $8556416/64000 = 133,69$ seg.

Ejercicio 3-8

Carácter 231 = 11100111

Secuencia de datos: 111001111110011111100111...

Ahora hay que hacer relleno de bits entre caracteres:

11100111111**1**10011111100111...

Las tramas con 2000 bits (250 bytes) llevarán 249 bits de relleno

La de 608 bits (76 bytes) llevará 75 de relleno.

Bits de relleno: $4194 * 249 + 75 = 1044381$

Bits transmitidos: $8556448 + 1044381 = \mathbf{9600797 \text{ bits}}$

Tiempo: $9600797/64000 = \mathbf{150,01 \text{ seg.}}$

Ejercicio 3-8

El uso de código EBCDIC no cambia en nada el resultado si el valor en binario se mantiene.