



Módulo 03

La Capa de Transporte

(Pt. 2)



Redes de Computadoras
Depto. de Cs. e Ing. de la Comp.
Universidad Nacional del Sur



Copyright

- Copyright © **2010-2024** A. G. Stankevicius
- Se asegura la libertad para copiar, distribuir y modificar este documento de acuerdo a los términos de la **GNU Free Documentation License**, versión 1.2 o cualquiera posterior publicada por la Free Software Foundation, sin secciones invariantes ni textos de cubierta delantera o trasera
- Una copia de esta licencia está siempre disponible en la página <http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html>
- La versión transparente de este documento puede ser obtenida de la siguiente dirección:

<http://cs.uns.edu.ar/~ags/teaching>



Contenidos

- Servicios y protocolos de la capa de transporte
- Multiplexado y demultiplexado de segmentos
- Transporte no orientado a la conexión (**UDP**)
- Teoría de transporte confiable de datos
- Transporte orientado a la conexión (**TCP**)
- Establecimiento y cierre de conexiones
- Teoría de control de congestión
- Control de congestión en **TCP**

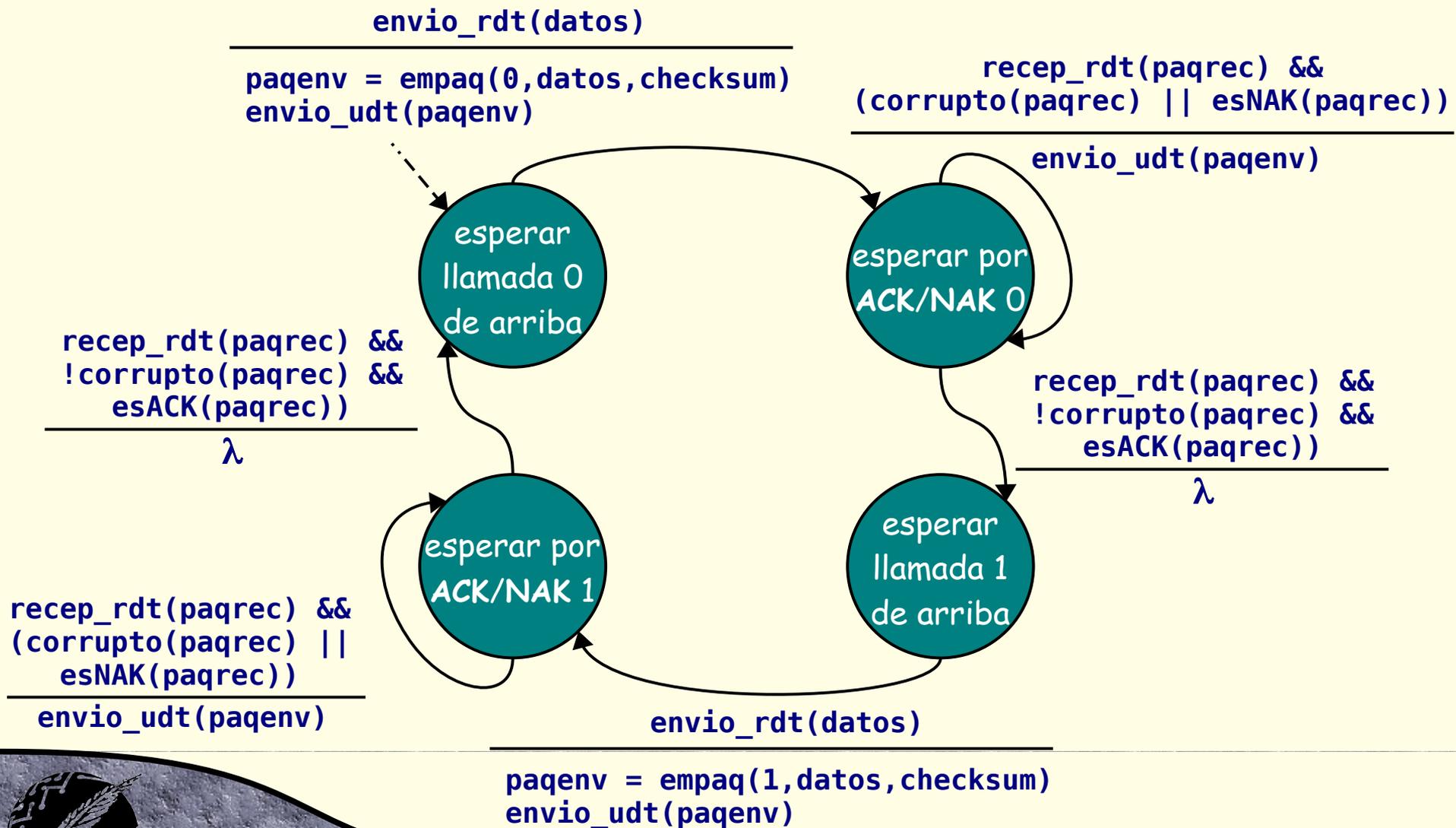


Paquetes duplicados

- Incorporar un **esquema de numeración de los paquetes** implica que el emisor marque cada paquete que envía con un cierto número
 - En el escenario que se corrompía el **ACK/NAK** enviado por el receptor, el emisor simplemente **asume que se trataba de un NAK y reenvía el último paquete** (usando el mismo número de paquete que la vez anterior)
 - El receptor en caso de recibir por segunda vez el mismo paquete **simplemente lo descarta**



Emisor RDT/2.1



Receptor RDT/2.1

recep_rdt(paqrec) &&
!corrupto(paqrec) &&
nrosec1(paqrec)

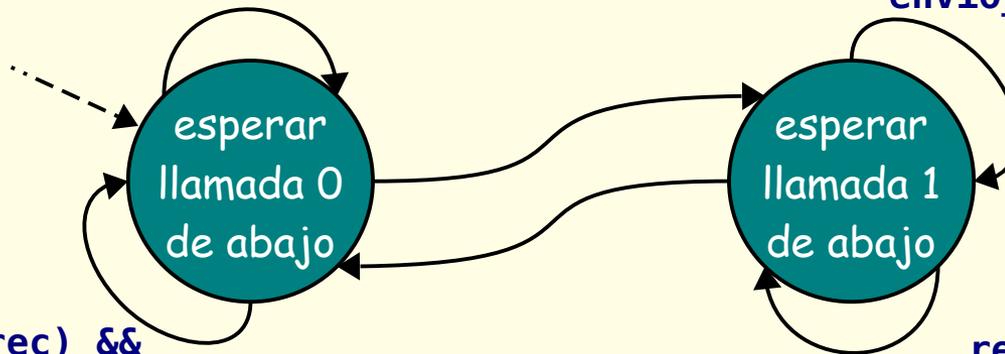
recep_rdt(paqrec) &&
!corrupto(paqrec) &&
nrosec0(paqrec)

recep_rdt(paqrec) &&
corrupto(paqrec)

datos = desempaq(paqrec)
entregar(datos)
paqenv = empaq(ACK,checksum)
envio_udt(paqenv)

paqenv = empaq(NAK,checksum)
envio_udt(paqenv)

paqenv = empaq(ACK,checksum)
envio_udt(paqenv)



recep_rdt(paqrec) &&
corrupto(paqrec)

recep_rdt(paqrec) &&
!corrupto(paqrec) &&
nrosec0(paqrec)

recep_rdt(paqrec) &&
!corrupto(paqrec) &&
nrosec1(paqrec)

datos = desempaq(paqrec)
entregar(datos)
paqenv = empaq(ACK,checksum)
envio_udt(paqenv)

paqenv = empaq(ACK,checksum)
envio_udt(paqenv)

paqenv = empaq(NAK,checksum)
envio_udt(paqenv)



Análisis de RDT/2.1

- **RDT/2.1** incorpora números de secuencia en los paquetes enviados por el emisor
 - Con **sólo dos números de paquete** es suficiente
- El emisor verifica la correcta recepción de los mensajes de **ACK/NAK**
- Los autómatas finitos que definen el protocolo **requieren el doble de estados** que en **RDT/2.0**
 - Los estados distinguen el número de secuencia del próximo paquete a ser enviado o recibido



Análisis de RDT/2.1

- El receptor debe verificar que los paquetes recibidos tengan el número de secuencia esperado
 - ➔ Caso contrario, se trata de un paquete duplicado, el cual debe ser descartado
- El receptor no tiene forma de saber si el emisor recibió correctamente el último **ACK/NAK**
 - ➔ Se dará cuenta implícitamente que el emisor recibió correctamente el **ACK** cuando vea un paquete numerado con el próximo valor de la secuencia



RDT/2.2

- El protocolo **RDT/2.1** admite ser optimizado evitando tener que hacer uso de los mensajes **NAK** de reconocimiento negativo
- La idea es que el receptor indique qué paquete está reconociendo al enviar un **ACK**
 - ➔ Debemos incorporar el número de secuencia en los mensajes enviados por el receptor
- La recepción por parte del emisor de un segundo **ACK** hace las veces de **NAK**
 - ➔ En ambos casos se debe reenviar el último paquete



Emisor RDT/2.2

envio_rdt(datos)

paqenv = empaq(0, datos, checksum)
envio_udt(paqenv)

recep_rdt(paqrec) &&
(corrupto(paqrec) || esACK1(paqrec))

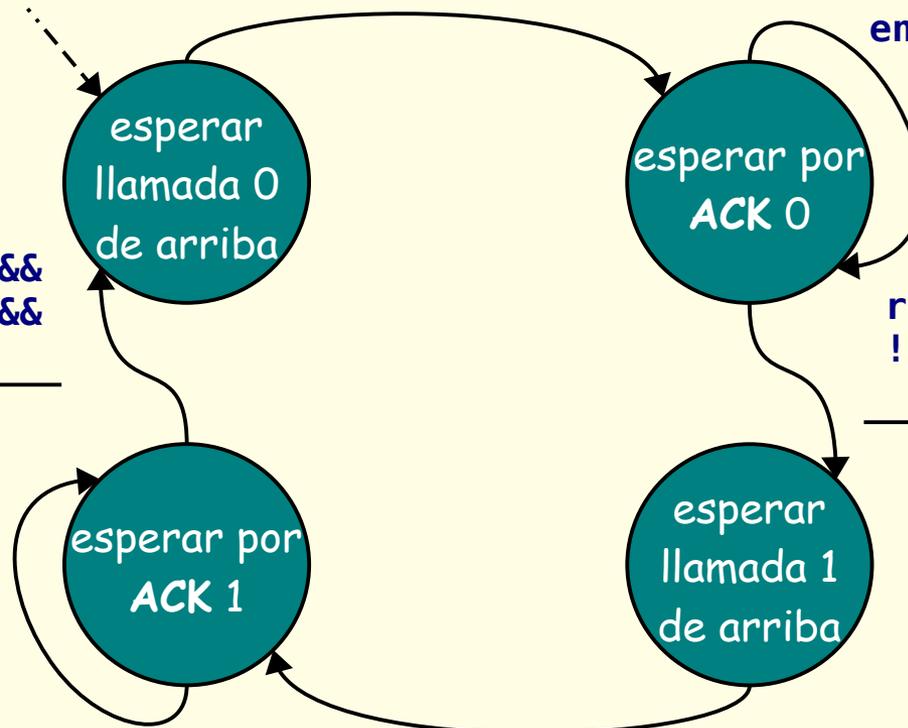
envio_udt(paqenv)

recep_rdt(paqrec) &&
!corrupto(paqrec) &&
esACK1(paqrec)

λ

recep_rdt(paqrec) &&
!corrupto(paqrec) &&
esACK0(paqrec)

λ



envio_udt(paqenv)

envio_rdt(datos)

paqenv = empaq(1, datos, checksum)
envio_udt(paqenv)



Receptor RDT/2.2

```
recep_rdt(paqrec) &&  
!corrupto(paqrec) && nrosec0(paqrec)
```

```
datos = desempaq(paqrec)  
entregar(datos)  
paqenv = empaq(0,ACK,checksum)  
envio_udt(paqenv)  
almenosunoenv = true
```

```
recep_rdt(paqrec) &&  
(corrupto(paqrec) || nrosec0(paqrec))
```

```
paqenv = empaq(0,ACK,checksum)  
envio_udt(paqenv)
```



```
recep_rdt(paqrec) &&  
(corrupto(paqrec) || nrosec1(paqrec))
```

```
if(almenosunoenv)  
paqenv = empaq(1,ACK,checksum)  
envio_udt(paqenv)
```

```
recep_rdt(paqrec) &&  
!corrupto(paqrec) && nrosec1(paqrec)
```

```
datos = desempaq(paqrec)  
entregar(datos)  
paqenv = empaq(1,ACK,checksum)  
envio_udt(paqenv)
```



RDT/3.0

- El protocolo **RDT/3.0** permite envío confiable de datos a través de un canal que puede causar errores a nivel de los bits y/o **perder en su totalidad alguno de los mensajes enviados**
 - ➔ El protocolo debe contemplar que se pierda un paquete o un mensaje de **ACK**
 - ➔ Se deben resolver dos problemas: **cómo detectar las pérdidas y qué hacer cuando se produzca una**
- Los mecanismos presentes en **RDT/2.2** no permiten detectar que se produjo una pérdida



RDT/3.0

- Un posible solución es quedar a la espera de un paquete o un mensaje **ACK** y **cuando se tenga la certeza de que se perdió reenviarlo**
 - ¿Cuánto hay que esperar para tener la certeza que se perdió el último mensaje enviado?
 - Esta alternativa funciona, pero implica pagar un costo muy alto en eficiencia al perderse un mensaje
- Una mejor opción es quedar a la espera de una respuesta **por un tiempo razonable** y si no llega **asumir que se perdió y reenviarlo**

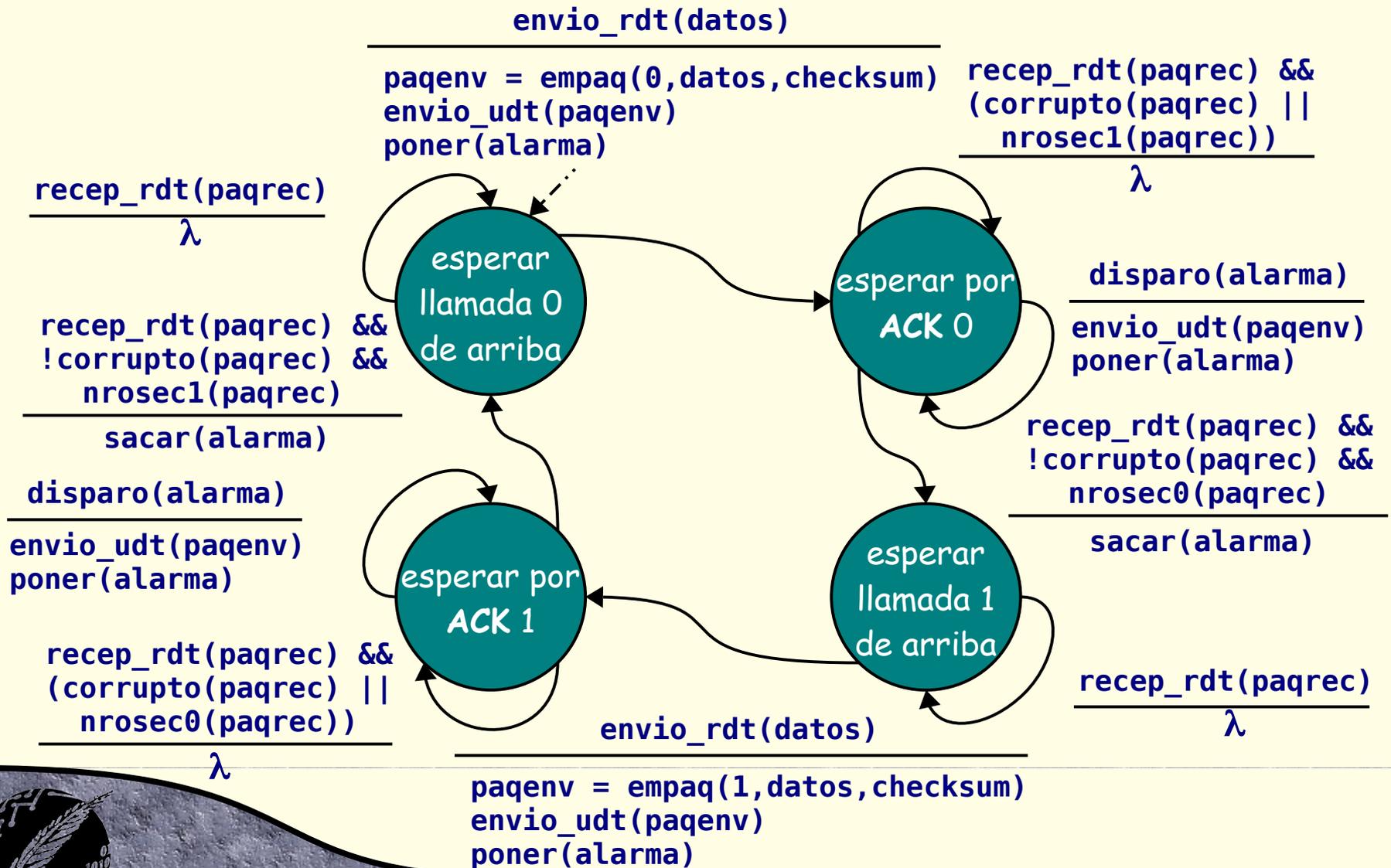


RDT/3.0

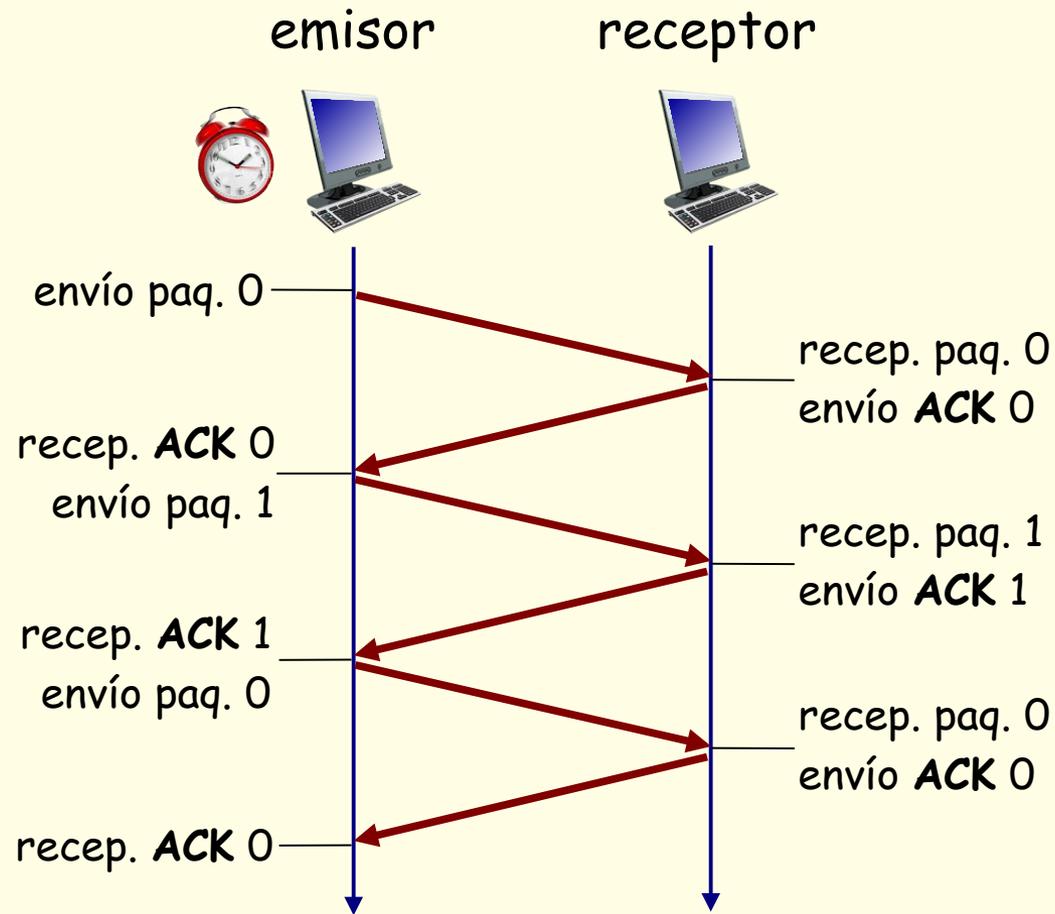
- ¿Qué sucede si en realidad el paquete estaba **retrasado**, pero **no se había perdido**?
 - El reenvió generará un mensaje duplicado, pero el protocolo ya maneja correctamente esa situación
 - Emisor y receptor deben indicar el número de secuencia en sus mensajes
- Para implementar esta política hace falta contar con un **temporizador programable**



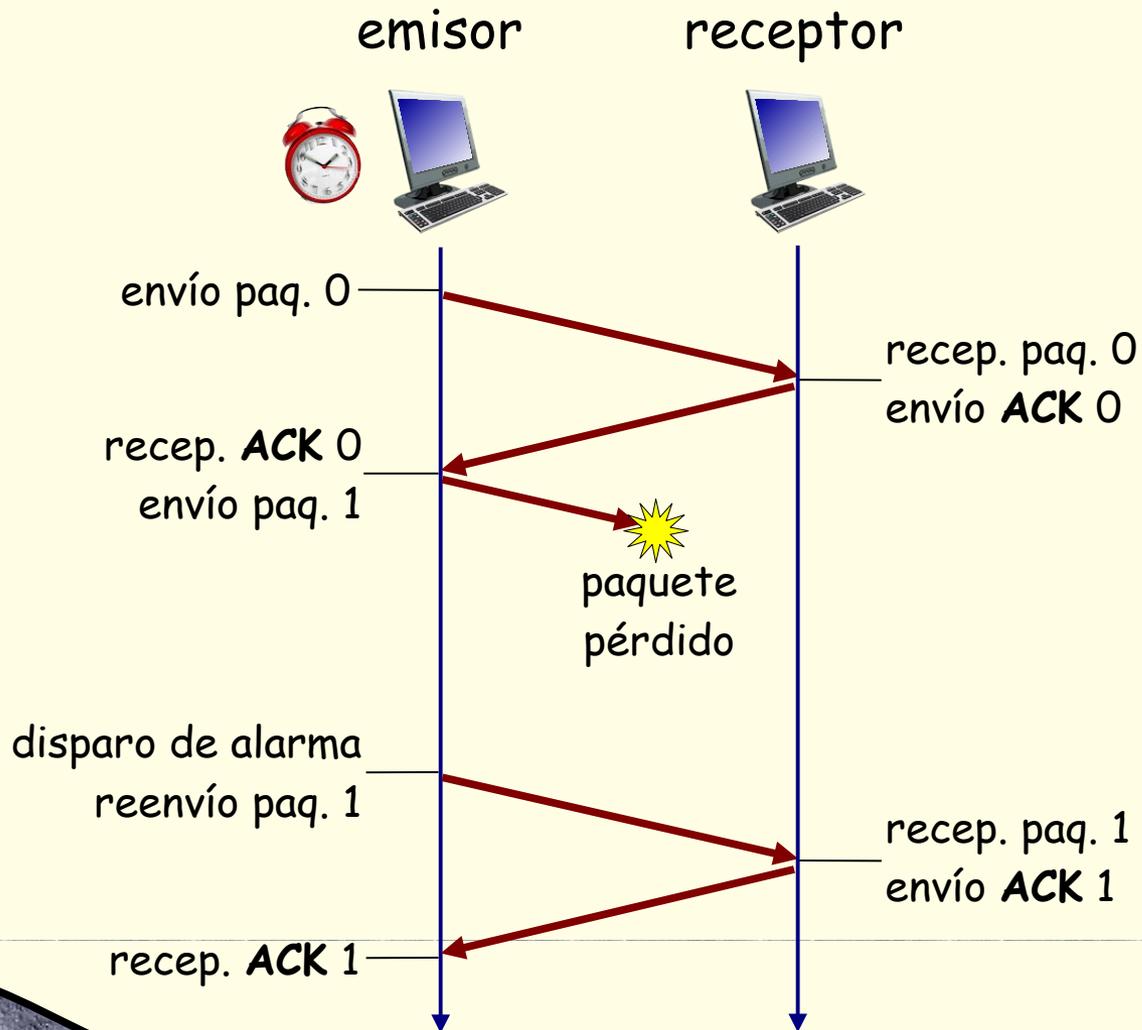
Emisor RDT/3.0



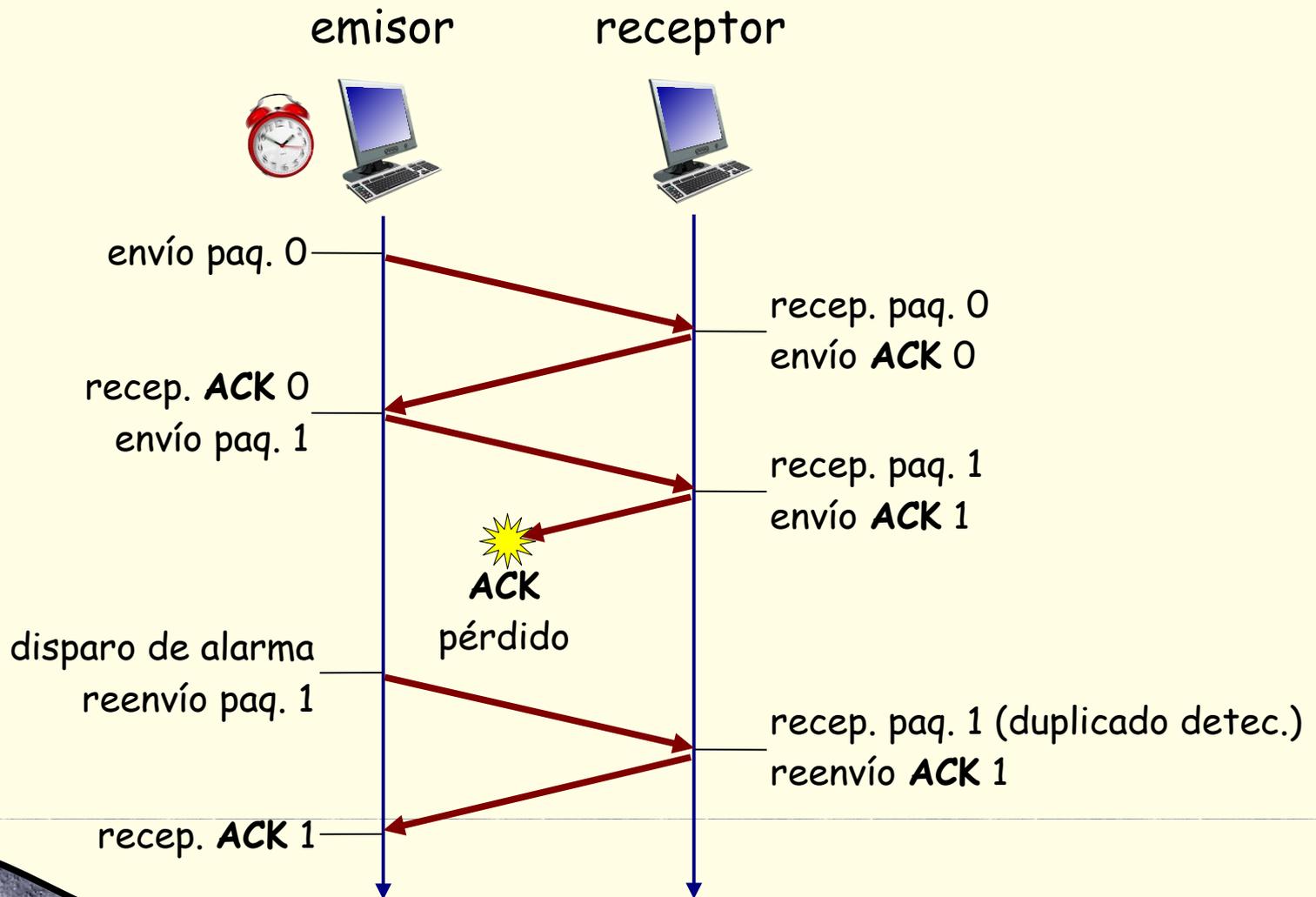
RDT/3.0 ideal



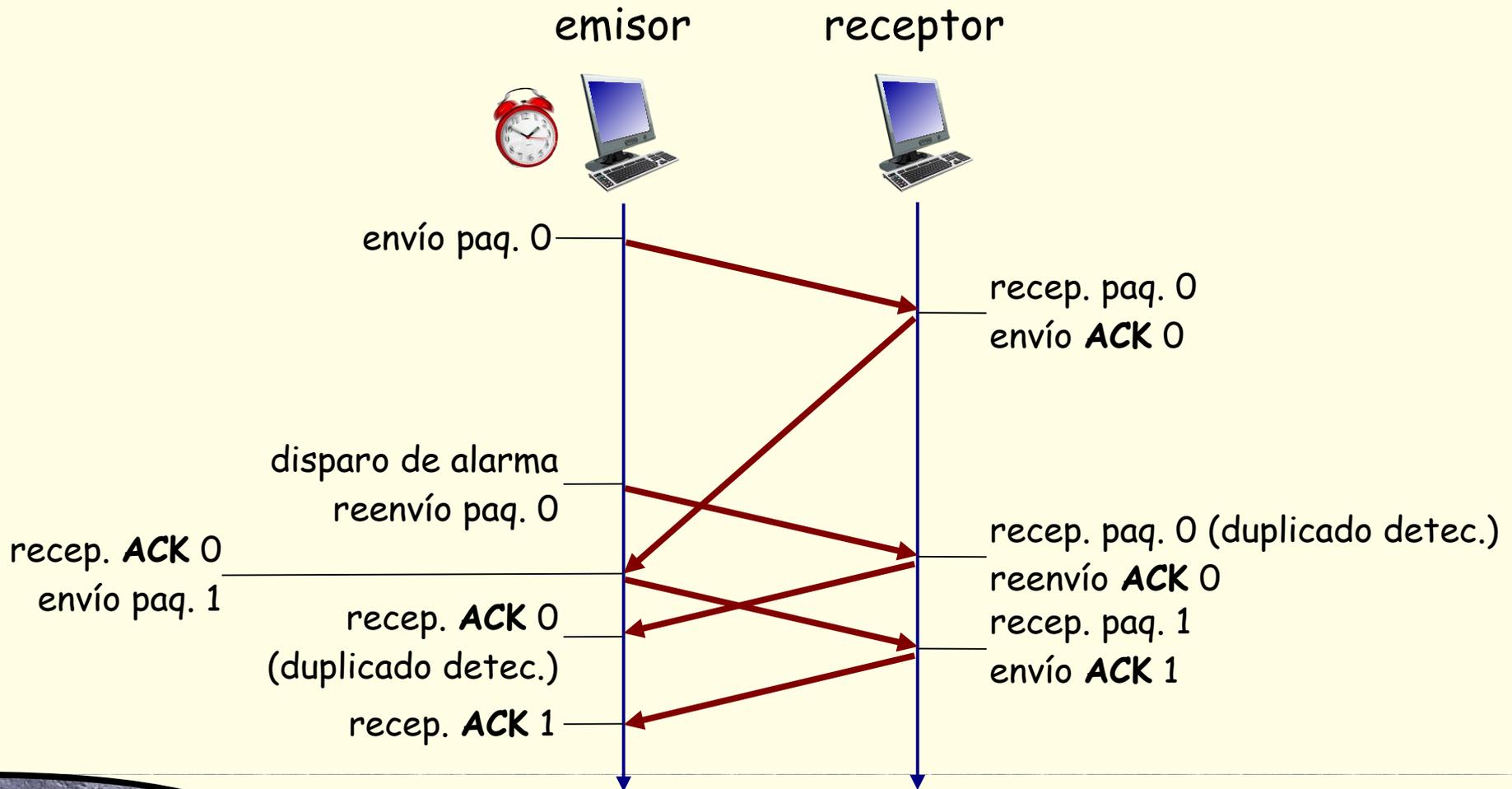
Pérdida de un paquete



Pérdida de un ACK



Reenvío prematuro



Análisis de RDT/3.0

- El protocolo **RDT/3.0** cumple con el objetivo propuesto, esto es, permite la transmisión confiable de datos sobre un canal no confiable
- No obstante, este protocolo **presenta un desempeño bastante pobre**, lo que lo torna poco aplicable a escenarios del mundo real
 - ➔ Esta es una característica propia de los protocolos de la familia “stop-and-wait”



Desempeño de RDT/3.0

● Consideremos la siguiente situación:

- Se dispone de una **línea dedicada de 1 Gb/s** que une dos de las oficinas de una cierta compañía
- Se intercambian **paquetes de 1 KB** y el **RTT** entre estas oficinas es de **30 ms**

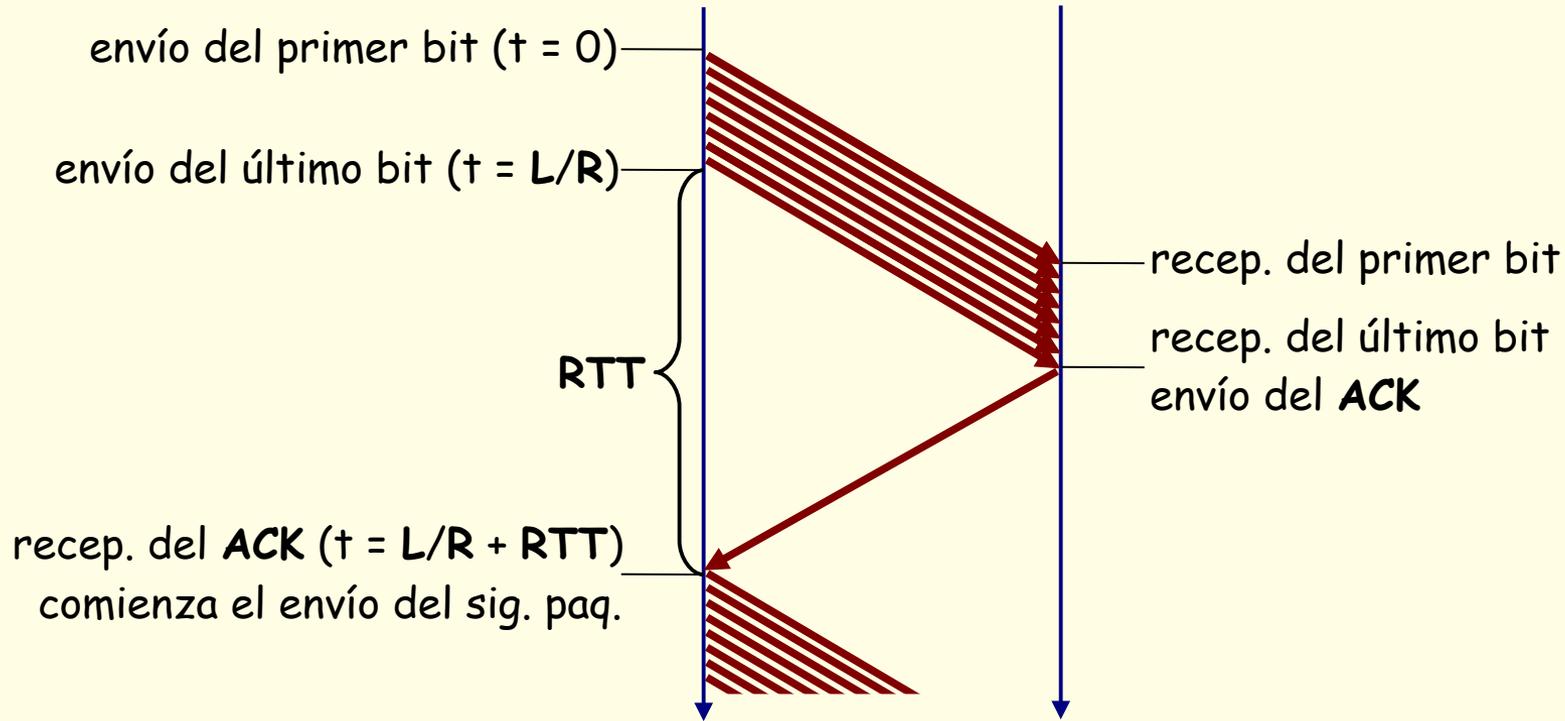
$$d_{trans} = \frac{L \text{ (cantidad de bits)}}{R \text{ (ancho de banda)}} = \frac{8000 \text{ b}}{10^9 \text{ b/s}} = 8 \text{ microseg.}$$

$$U_{enlace} = \frac{L/R}{RTT + L/R} = \frac{.008 \text{ ms}}{30.008 \text{ ms}} = 0.027\%$$

$$1 \text{ paq.} / 30 \text{ ms} = 1 \text{ Gb/s} \times 0.027\% = 33.3 \text{ KB/s}$$



Operatoria stop-and-wait



$$U_{enlace} = \frac{L/R}{RTT + L/R} = \frac{.008 \text{ ms}}{30.008 \text{ ms}} = 0.027\%$$

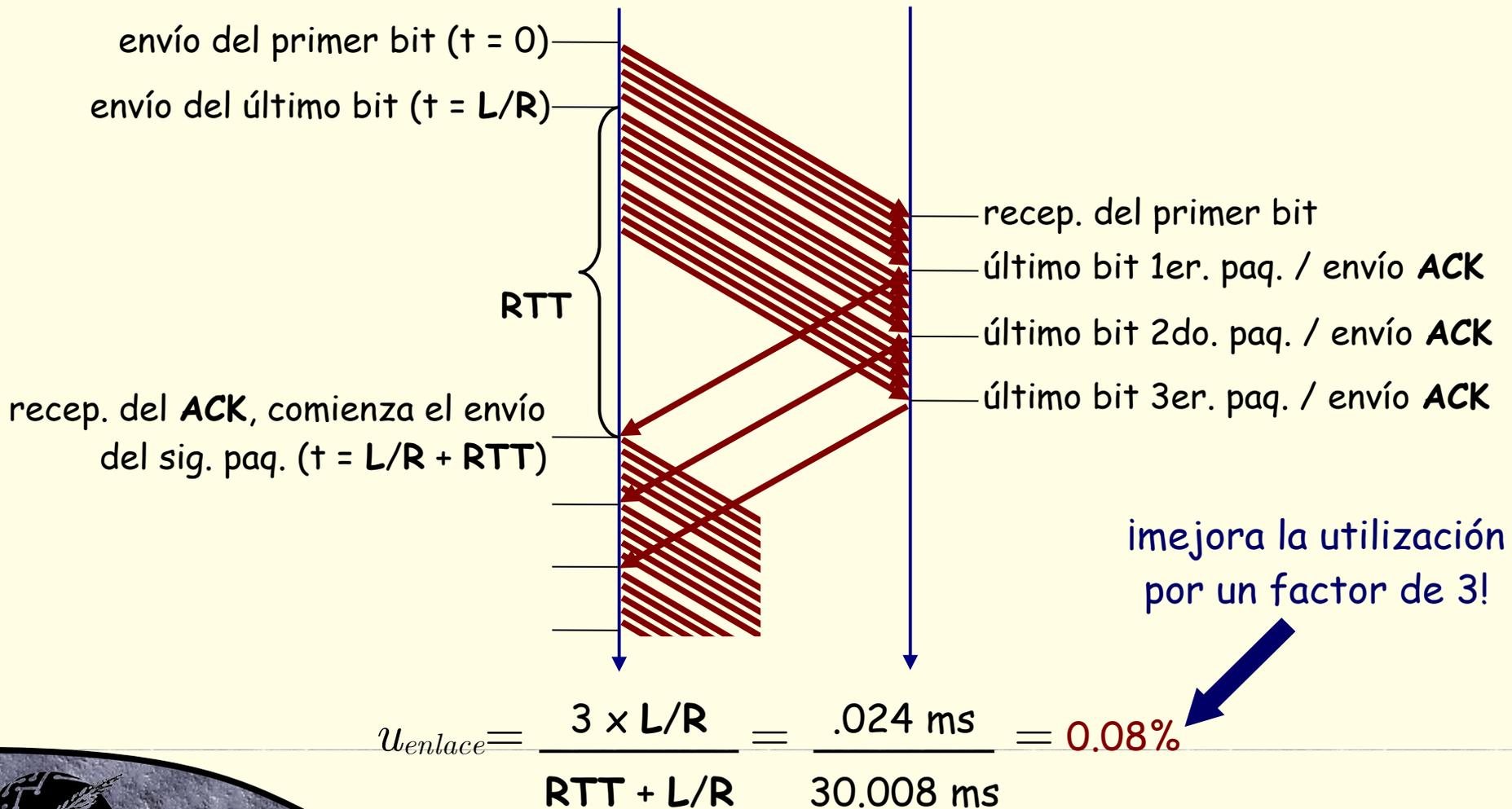


Operatoria en pipeline

- El factor de utilización obtenido de apenas 0.027% es a las claras inaceptable
- Habría que permitir una **operatoria en pipeline** a fin de elevar el factor de ocupación
 - La idea básica es **permitir que varios paquetes estén en camino al mismo tiempo**
 - A tal efecto hace falta **incrementar los números de secuencia disponibles**
 - También hace falta alguna forma de **almacenamiento intermedio tanto en emisor como receptor**



Operatoria en pipeline



Operatoria en pipeline

● Go-Back N (**GBN**)

- El emisor puede tener hasta **n** paquetes aun sin confirmar
- El receptor sólo envía **ACKs** acumulativos (ino tolera huecos!)
- El emisor sólo requiere un temporizador para el paquete más antiguo sin reconocer

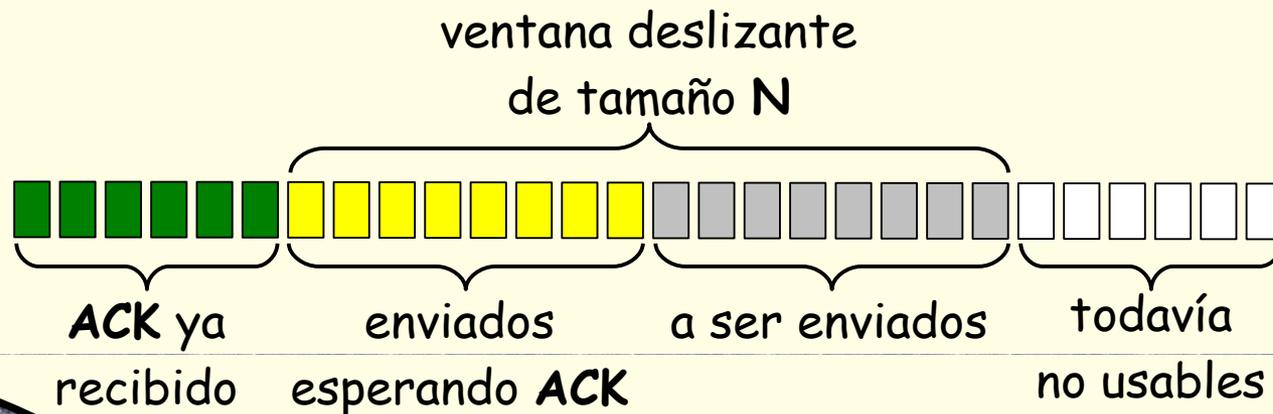
● Selective Repeat (**SR**)

- El emisor puede tener hasta **n** paquetes aun sin confirmar
- El receptor envía **ACKs** individuales para cada paquete
- El emisor mantiene un temporizador para paquete aun no reconocido

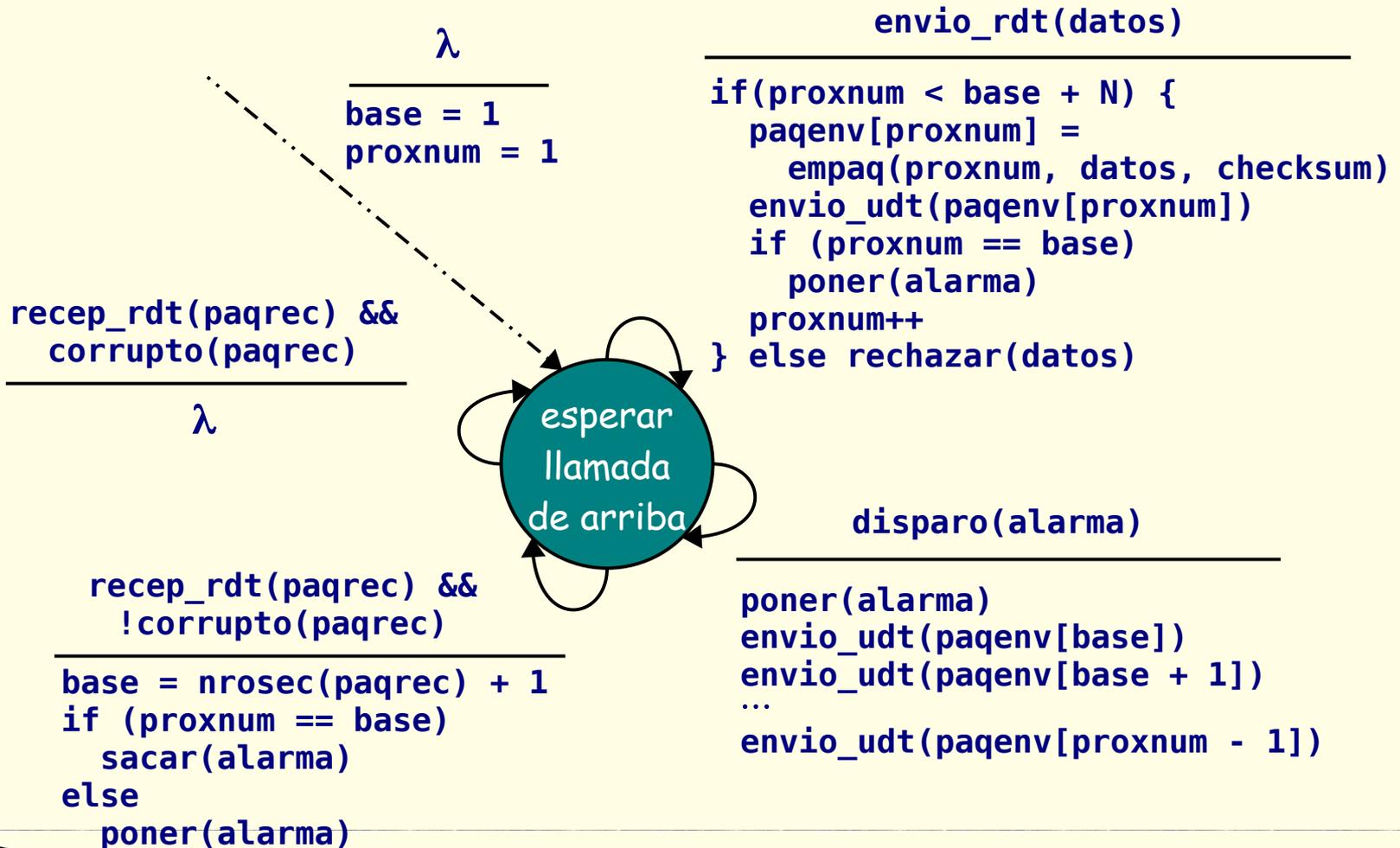


Protocolo Go-Back-N

- El protocolo **GBN** es una de las formas de implementar la operatoria en pipeline
 - Se reservan **k** bits del encabezado para los números de secuencia de los paquetes
 - Se permiten hasta una **ventana deslizante** de **n** paquetes en tránsito, esto es, aquellos cuales cuya confirmación de recepción aún no ha sido recibida



Emisor GBN



Receptor GBN

λ

```
proxnumreq = 1  
paqenv = empaq(0, ACK, checksum)
```

```
recep_rdt(paqrec) && !corrupto(paqrec) &&  
(nrosec(paqrec) == proxnumreq)
```

```
datos = desempaq(paqrec)  
entregar(datos)  
paqenv = empaq(proxnumreq, ACK, checksum)  
envio_udt(paqenv)  
proxnumreq++
```



```
recep_rdt(paqrec) &&  
(corrupto(paqrec) || (nrosec(paqrec) != proxnumreq))
```

```
envio_udt(paqenv)
```

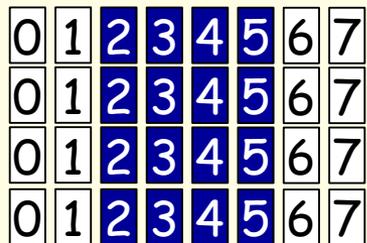
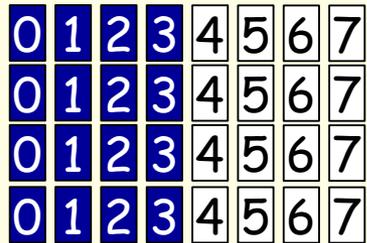


Análisis GBN

- El receptor sólo envía un mensaje de **ACK** para el paquete correctamente recibido con mayor número de secuencia
 - Esta política puede generar **mensajes de ACK duplicados**
 - El receptor sólo necesita recordar **el número de secuencia del próximo paquete** que desea
- Los paquetes recibidos fuera de orden son descartados
 - El receptor **no requiere almacenamiento intermedio**



GBN en acción



rec. **ACK 0**, env. paq. 4

rec. **ACK 1**, env. paq. 5



reenvío paq. 2

reenvío paq. 3

reenvío paq. 4

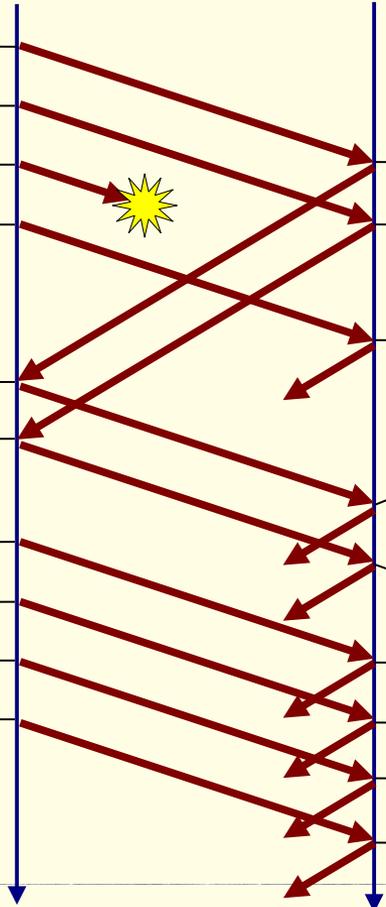
reenvío paq. 5

envío paq. 0

envío paq. 1

envío paq. 2

envío paq. 3



recep. paq. 0, envío **ACK 0**

recep. paq. 1, envío **ACK 1**

recep. paq. 3 (se descarta)

reenvío **ACK 1**

recep. paq. 4 (se descarta)

reenvío **ACK 1**

recep. paq. 5 (se descarta)

reenvío **ACK 1**

recep. paq. 2, envío **ACK 2**

recep. paq. 3, envío **ACK 3**

recep. paq. 4, envío **ACK 4**

recep. paq. 5, envío **ACK 5**

Repetición Selectiva

- El protocolo Repetición Selectiva (**SR**) es otra implementación de la operatoria en pipeline
 - La idea central es disminuir el número de paquetes a ser reenviados al recuperarse de una pérdida
- A diferencia de **GBN**, el receptor **reconoce por separado a cada uno de los paquetes** correctamente recibidos
 - El receptor **debe contar con un almacenamiento intermedio** para alojar los paquetes recibidos correctamente pero fuera de orden



Repetición Selectiva

- El emisor sólo debe reenviar aquellos paquetes para los que aún no se haya recibido el mensaje de **ACK** correspondiente
 - ➔ Esto implica que **debemos contar con un temporizador independiente para cada paquete enviado** cuyo **ACK** asociado aún no haya sido recibido
- El emisor cuenta con una ventana deslizante de **n** números consecutivos de secuencia
 - ➔ La ventana representa el conjunto de paquetes que tiene permitido tener en tránsito al mismo tiempo

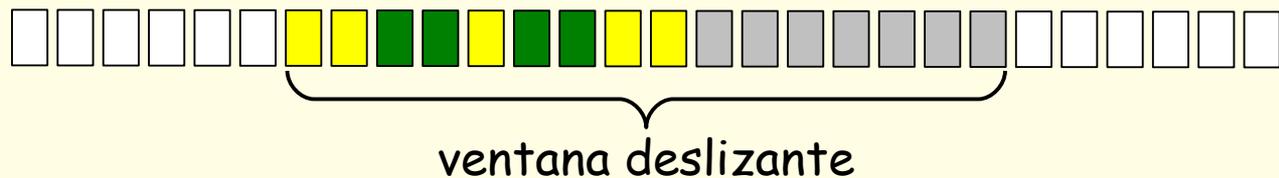


Visión del emisor y receptor

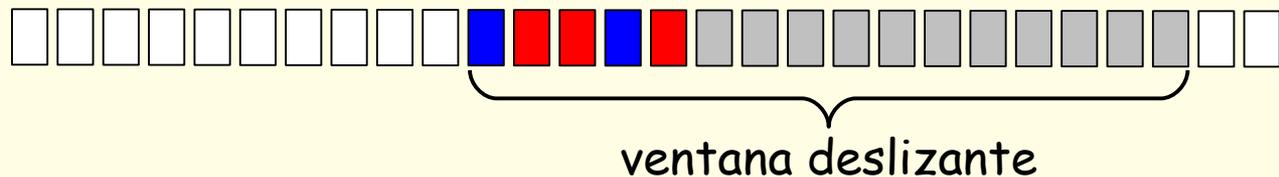
- enviados, **ACK** ya recibido
- enviados, esperando **ACK**
- usables, a ser enviados
- no usables

- recibidos fuera de orden, **ACK** ya enviado
- a la espera, aún no recibidos
- aceptables
- no usables

emisor SR



receptor SR



Emisor SR

- El **emisor SR** debe reaccionar ante los eventos que se presenten de la siguiente manera:
 - ➔ Al recibir un nuevo paquete a ser enviado debe verificar si el siguiente número de secuencia se encuentra dentro de la ventana
 - ➔ Al dispararse la alarma de un paquete debe reenviar sólo ese paquete y debe reiniciar el temporizador
 - ➔ Al recibir un **ACK** debe marcar ese paquete como recibido y en caso de ser el menor número de paquete no reconocido, debe avanzar la ventana hasta el próximo paquete aún sin reconocer



Receptor SR

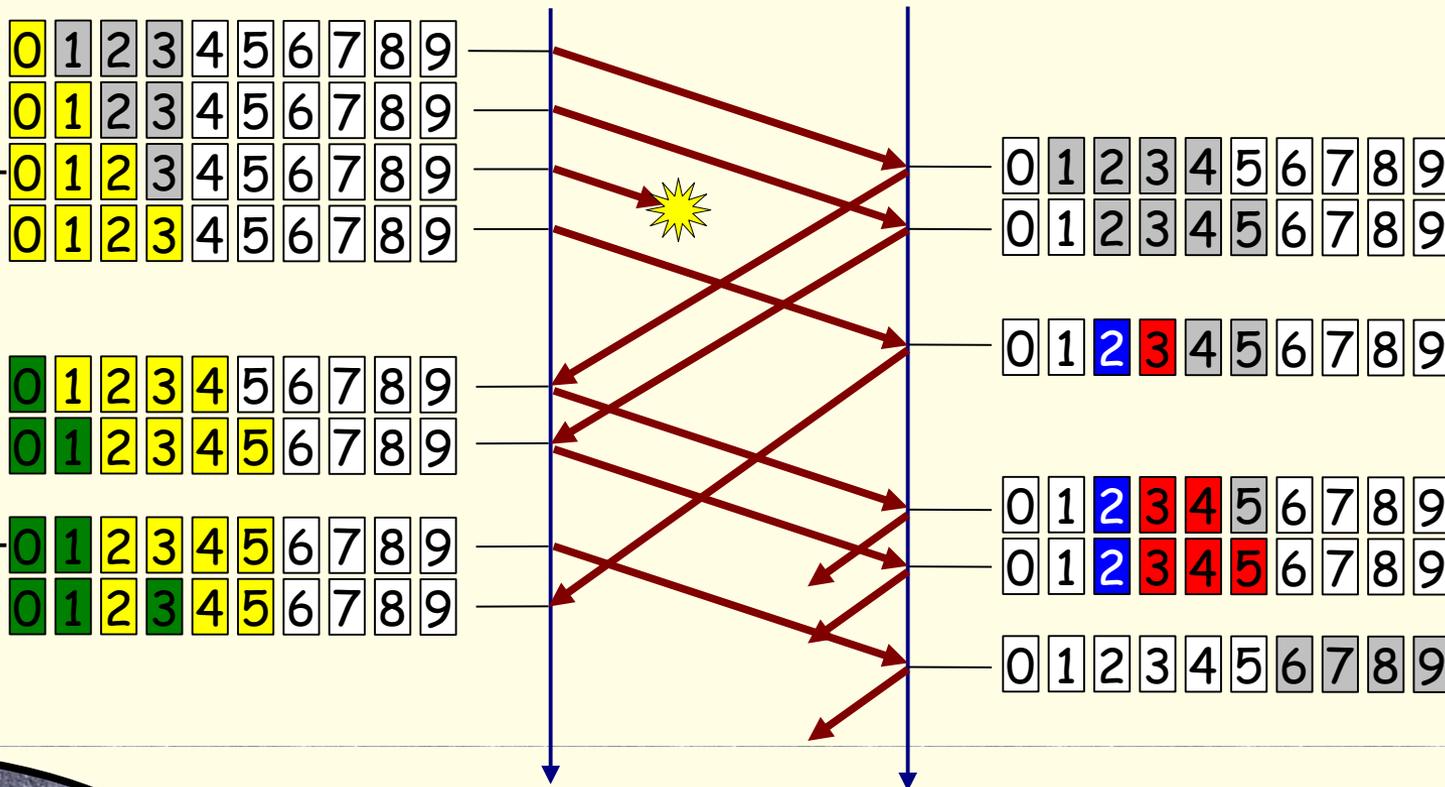
- El receptor **SR** debe reaccionar ante los eventos que se presenten de la siguiente manera:
 - Al recibir un paquete con número de secuencia **base** se envía su **ACK** y se avanza la ventana hasta el próximo paquete esperado pero aún no recibido
 - Al recibir un paquete con número de secuencia entre **base+1** y **base+n-1** se envía su **ACK** y se guarda provisoriamente en el almacenamiento intermedio
 - Al recibir un paquete con número de secuencia entre **base-n** y **base-1** sólo se envía su respectivo **ACK**
 - En cualquier otro caso, no se toma acción alguna



Protocolo SR en acción

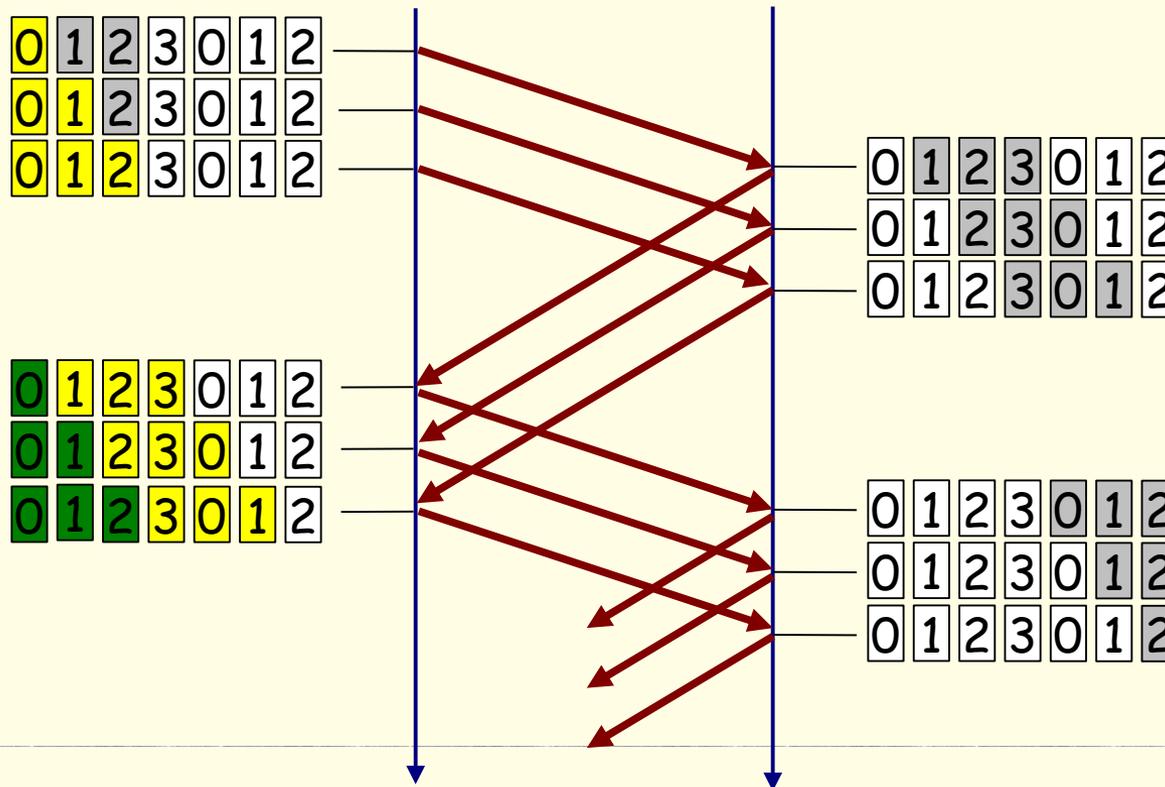
- enviados conf.
- enviados no conf.
- fuera de orden
- a la espera
- usables
- no usables


 alarma
 paq. 2



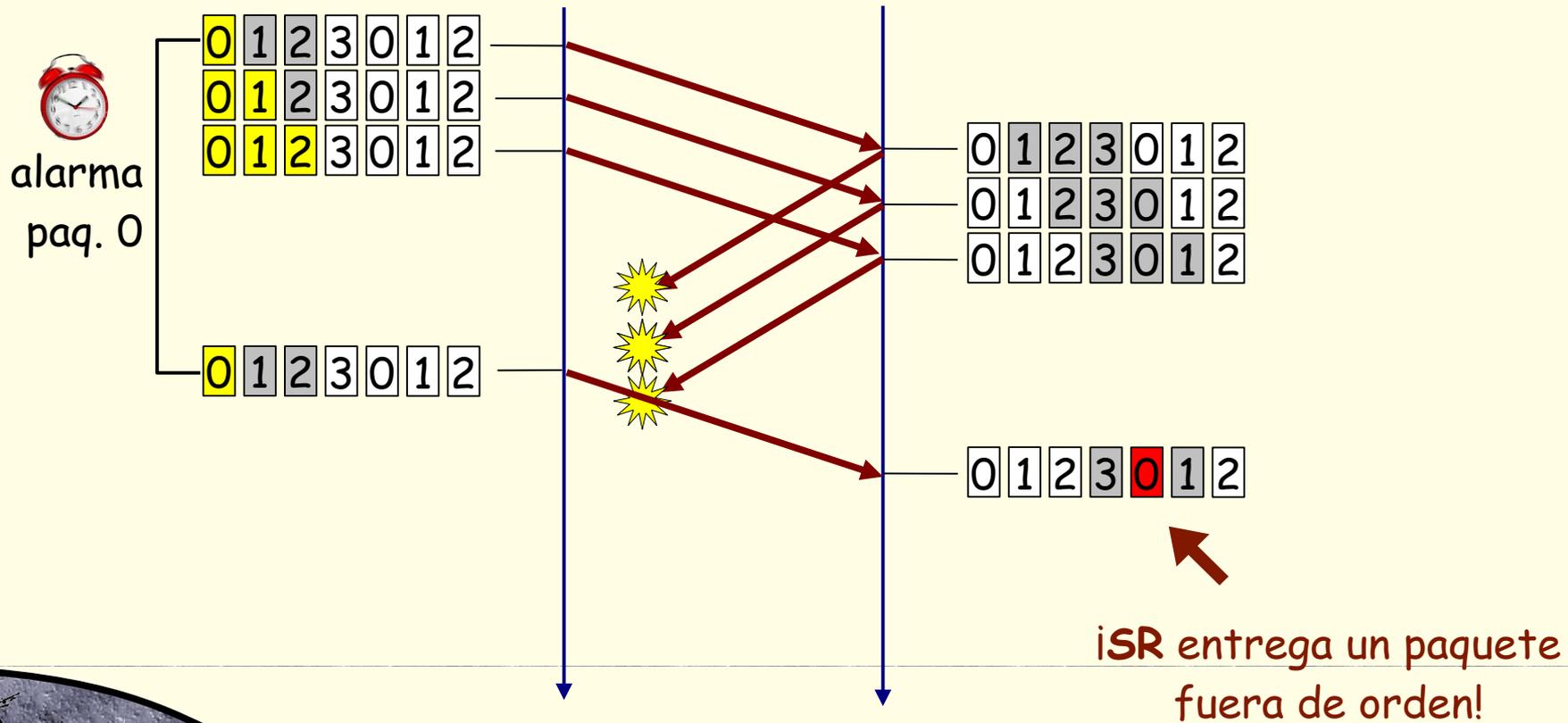
El dilema del receptor SR

- enviados conf.
- enviados no conf.
- fuera de orden
- a la espera
- usables
- no usables



El dilema del receptor SR

- enviados conf.
- enviados no conf.
- fuera de orden
- a la espera
- usables
- no usables



Análisis SR

- El receptor **SR** no tiene forma de distinguir entre estos dos escenarios
 - En el primer caso el funcionamiento es el esperado, pero en el segundo caso, **SR termina entregando un paquete fuera de orden**
- ¿Qué relación tiene que cumplirse entre el tamaño de ventana y el conjunto de números de secuencia disponibles?
 - El tamaño de ventana debe ser menor o igual a la mitad de la cantidad de números de secuencia



¿Preguntas?

