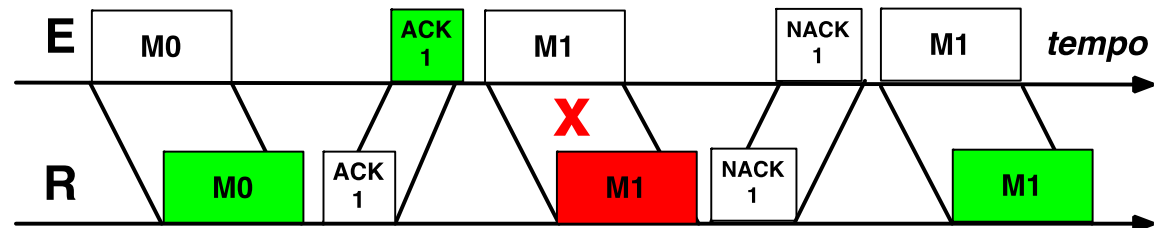


# Nível Ligação de Dados (*Data Link Layer*)

- Como se corrigem tramas detectadas como tendo erros?
  - Caso o código permita corrigir erros (e.g., Hamming)  
Efectuado no receptor (FEC - Forward Error Correction)
  - Caso o código apenas permita detectar erros (e.g. CRC)

Pelo emissor (ARQ)  
colaborando com o  
receptor - **protocolo!**



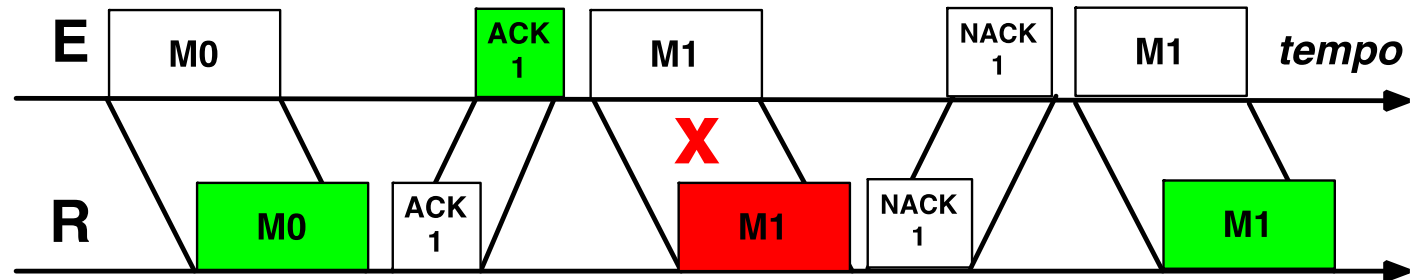
# Protocolos do Nível de Ligação de Dados

- Objectivos:
  - **Controlo de erros por ARQ:** mecanismo para controlar a retransmissão de dados em caso de erro
  - **Controlo de fluxo:** mecanismo para restringir a quantidade de dados que o emissor pode enviar para o receptor
- Famílias de protocolos:
  - *Stop-and-Wait*
  - *Sliding Window:*
    - *Go-Back-N*
    - *Selective Repeat*

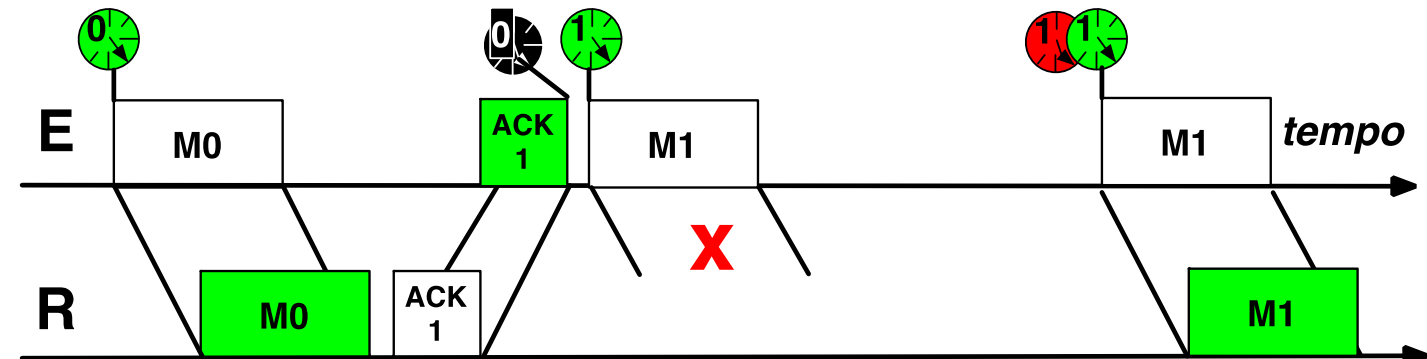
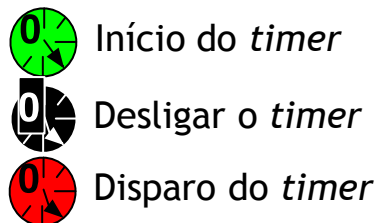
# Erros na Transmissão e ARQ

Correcção dos erros por retransmissão automática por parte do emissor.  
Utilização de avisos de recepção positivos ACK e negativos NACK, e temporizadores  
(Nota: num ACK o valor  $n$  indica o próximo número de sequência esperado).

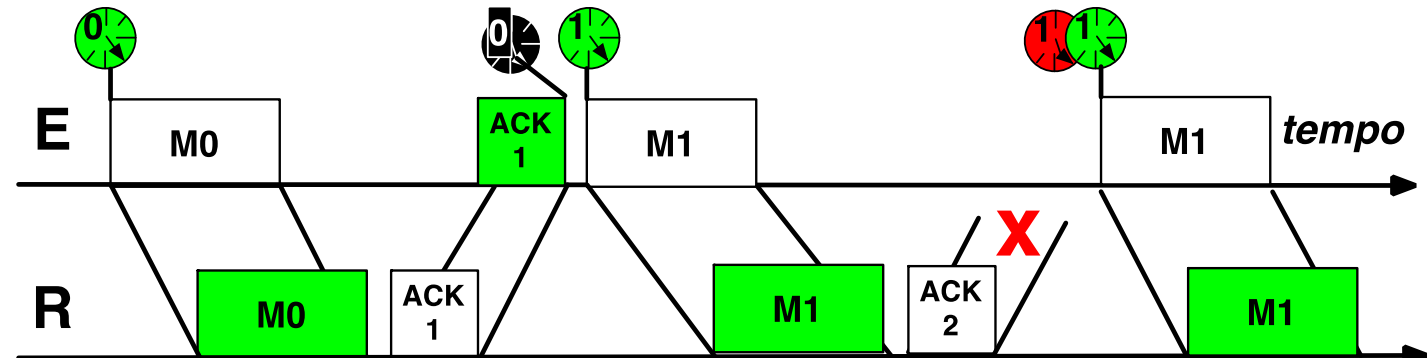
- Uso de NACK para sinalizar tramas com erro e que devem ser repetidas



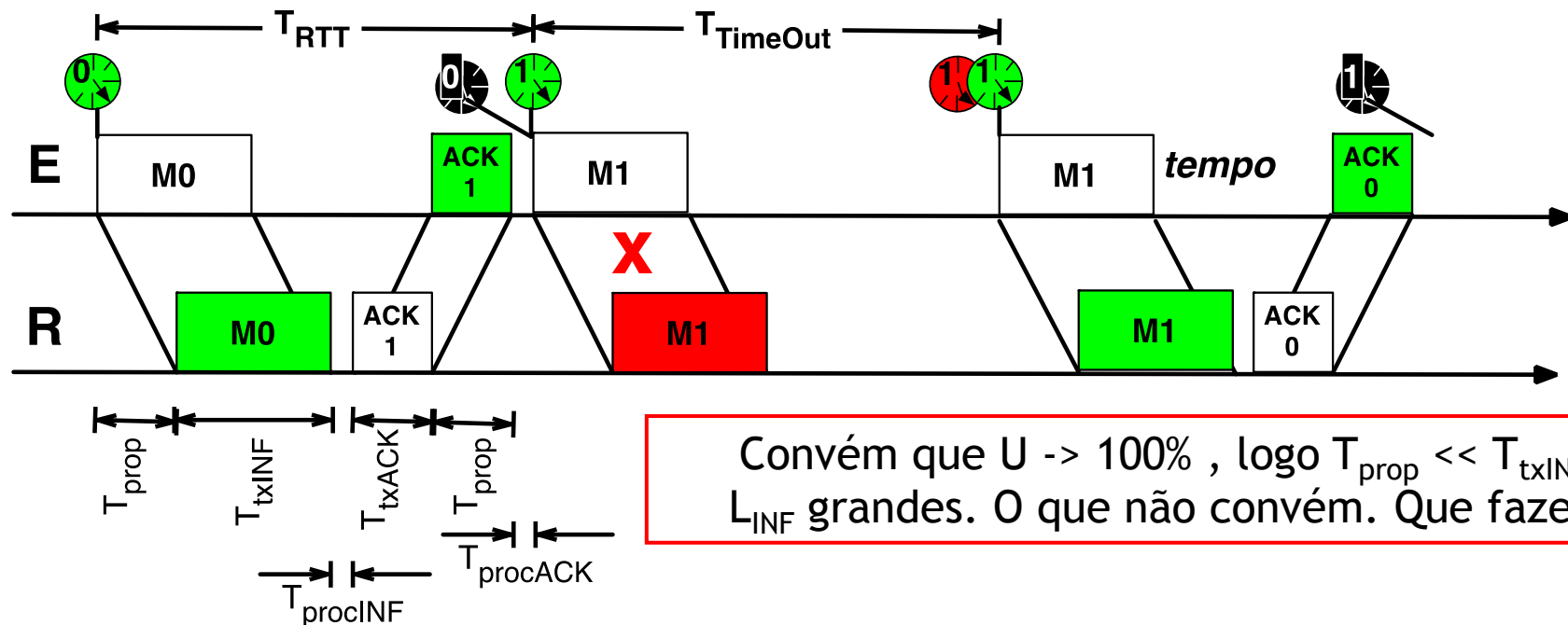
- Perda/erro na trama  
Utilização de *timers* (temporizadores)



- Perda/erro no ACK  
Utilização de *timers* (temporizadores)



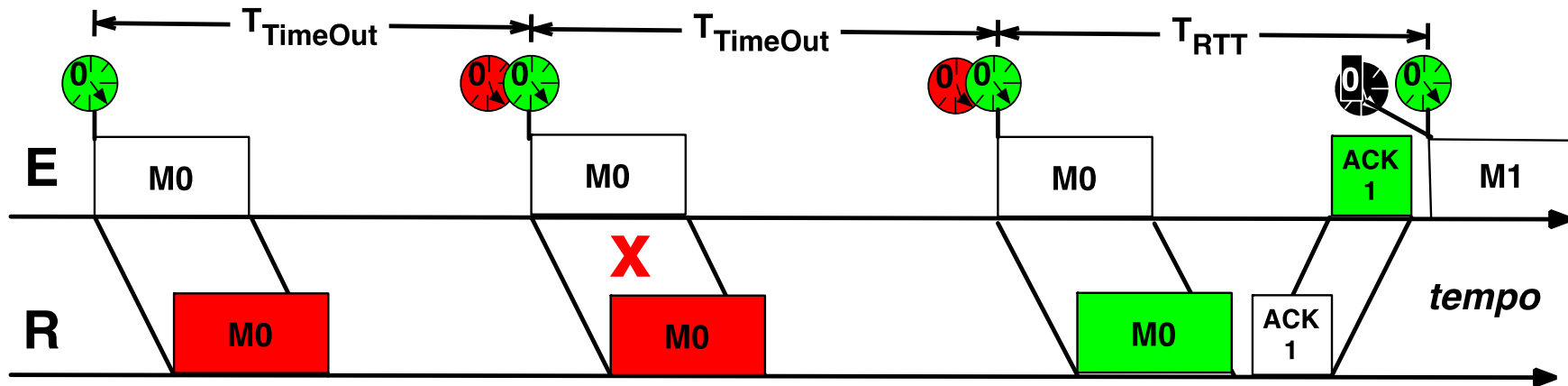
# ARQ: Protocolo *Stop-and-Wait* (S&W)



Convém que  $U \rightarrow 100\%$ , logo  $T_{\text{prop}} \ll T_{\text{txINF}}$  e  $L_{\text{INF}}$  grandes. O que não convém. Que fazer ??

- Necessita apenas um bit (0,1) para numeração/identificação das tramas
- *Round-Trip-Time* ( $T_{\text{RTT}}$ ):  $T_{\text{RTT}} = T_{\text{txINF}} + T_{\text{prop}} + T_{\text{procINF}} + T_{\text{txACK}} + T_{\text{prop}} + T_{\text{procACK}}$   
 $T_{\text{txINF}}$ : tempo tx tramas de informação,  $T_{\text{txACK}}$ : tempo tx tramas de ACK  
 $T_{\text{procINF}}$ : tempo *processamento* tramas de informação,  $T_{\text{procACK}}$ : tempo *processamento* tramas de ACK
- *Valor mínimo do temporizador* ( $T_{\text{TimeOut}}$ ):  $T_{\text{TimeOut}} \geq T_{\text{RTT}}$
- *Taxa de utilização do canal* ( $U_{\text{S\&W}}$ ):  $U_{\text{S\&W}} = T_{\text{txINF}} / T_{\text{RTT}}$   
 $U_{\text{S\&W}} = T_{\text{txINF}} / T_{\text{RTT}} = T_{\text{txINF}} / (T_{\text{txINF}} + T_{\text{prop}} + T_{\text{procINF}} + T_{\text{txACK}} + T_{\text{prop}} + T_{\text{procACK}})$   
se  $T_{\text{procINF}}, T_{\text{txACK}}, T_{\text{procACK}} \approx 0$  então  $U_{\text{S\&W}} \approx 1/(1+2a)$  com  $a = T_{\text{prop}} / T_{\text{txINF}}$

# Desempenho protocolo *Stop-and-Wait* com erros



- Taxa de utilização do canal com erros ( $U_{S\&W\_erros}$ ):

$$U_{S\&W\_erros} = \frac{T_{tx}}{(E[N_{tx}] - 1) \cdot T_{TimeOut} + T_{RTT}}$$

$\xrightarrow{\text{Tempo útil}}$   
 $\xrightarrow{\text{Tempo de um ciclo}}$

- Valor esperado do número de transmissões ( $E[N_{tx}]$ ):

$$\hat{N}_{tx} = E[N_{tx}] = \sum_{i=1}^{\infty} i \cdot p_i = \sum_{i=1}^{\infty} i \cdot (1 - p_{sucesso})^{i-1} \cdot p_{sucesso} = 1/p_{sucesso}$$

$p_i$ , probabilidade de serem necessárias  $i$  transmissões

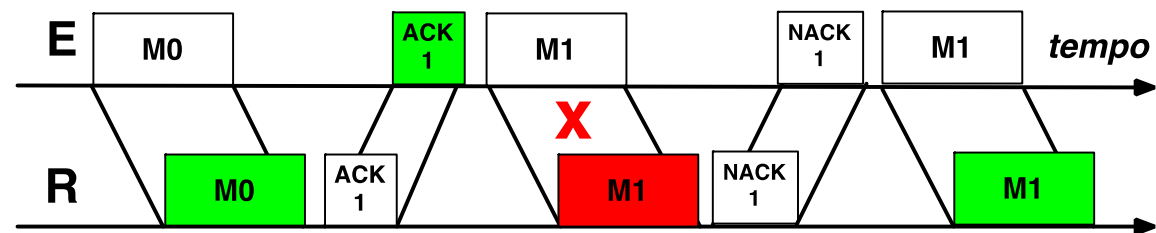
$i-1$ , insucessos

sucesso na  $i$ -ésima tentativa

# Nível Ligação de Dados (*Data Link Layer*)

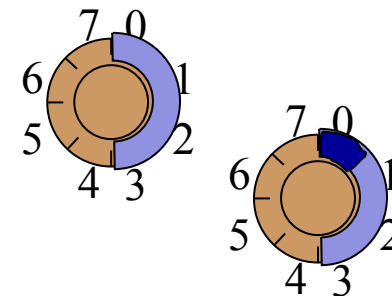
- Como se poderá melhorar a taxa de utilização do *Stop&Wait*?

- O que é o factor mais limitativo?

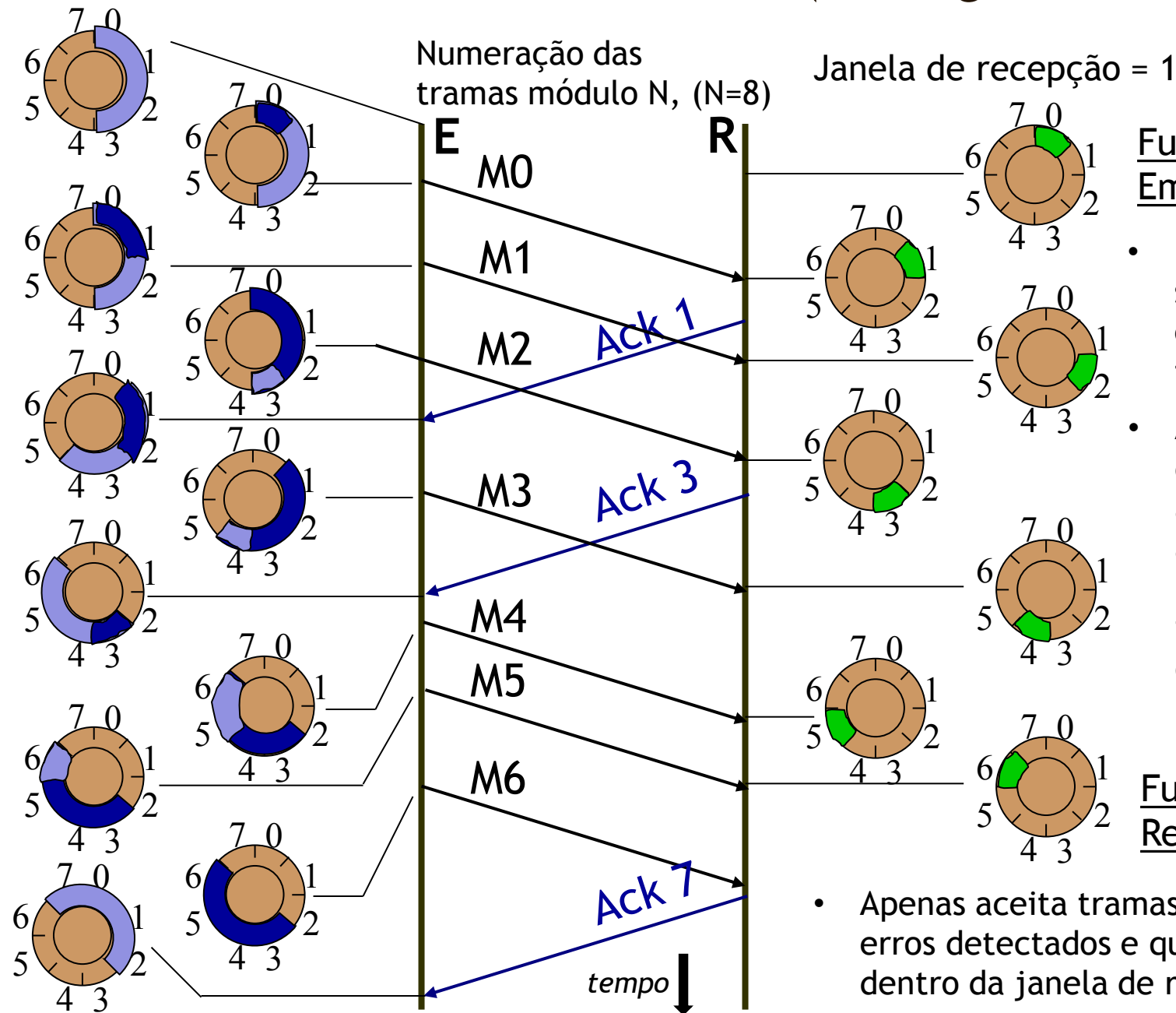


- Como se poderiam enviar várias tramas sem ter de esperar?

Usar a memória do emissor e receptor:  
Janelas de transmissão e recepção.



# Janela de transmissão = 4 Janela Deslizante (*Sliding Window*)



## Funcionamento do Emissor

- Pode enviar tramas sem receber Ack até esgotar a janela de transmissão.
- Ao receber um Ack  $n$  com  $n$  pertencendo às tramas ainda sem aviso de recepção, retira a trama  $n-1$  e todas as anteriores da janela (efeito **cumulativo**).

## Funcionamento do Receptor

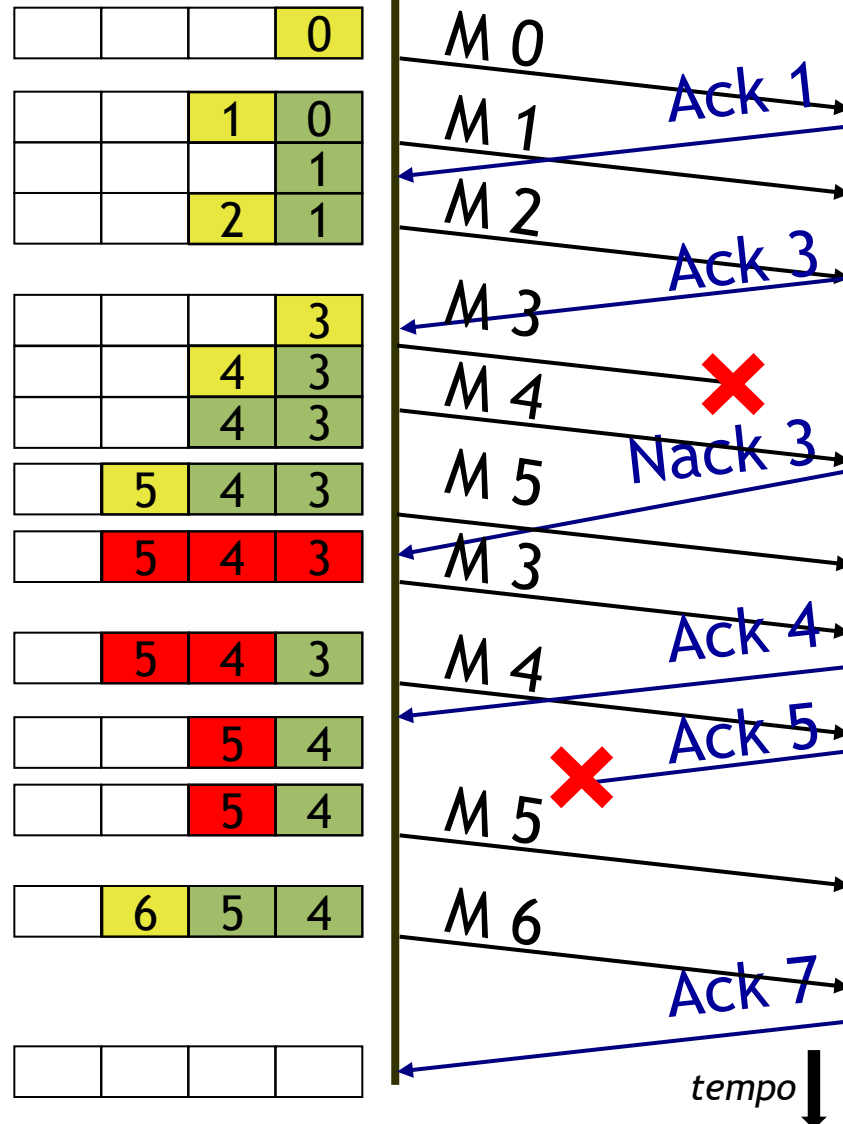
- Apenas aceita tramas que não tenham erros detectados e que se encontrem dentro da janela de recepção.

## Go-Back-N (GB-n)

Tamanho da janela de tx,  $W = J_{tx} = 4$

Tamanho da janela de rx,  $J_{rx} = 1$

Indicação de erro implica a retransmissão de **todas** as tramas deste a sinalizada com “em falta/errada”!



- 1ª transmissão
- À espera de Ack
- Para retransmissão

- Valor máximo para  $J_{tx}$ :  $J_{tx} \leq N-1$
- Transmissão sem parar (espera) se:

$$T_{RTT} < T_{txINF} \times J_{tx}$$

↓  
Chegada ACK, liberta janela

↓  
Esgota janela

- Desempenho (sem erros):

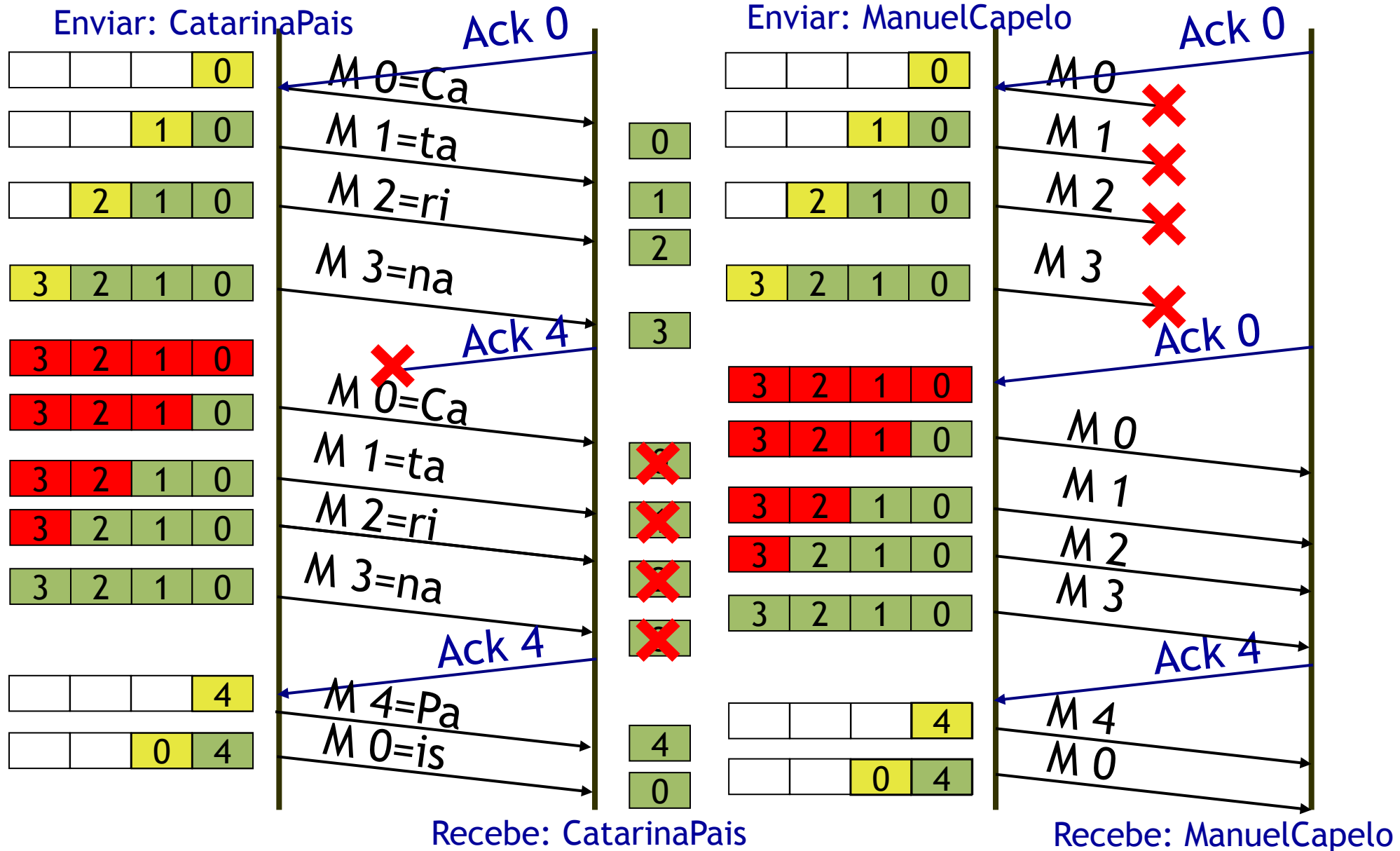
$$U_{GB-n} = \begin{cases} 1, & \text{caso } T_{RTT} < T_{tx} \cdot J_{tx} \\ \frac{T_{tx} \cdot J_{tx}}{T_{RTT}}, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

- Garante a entrega ordenada, sem falhas ou duplicados!



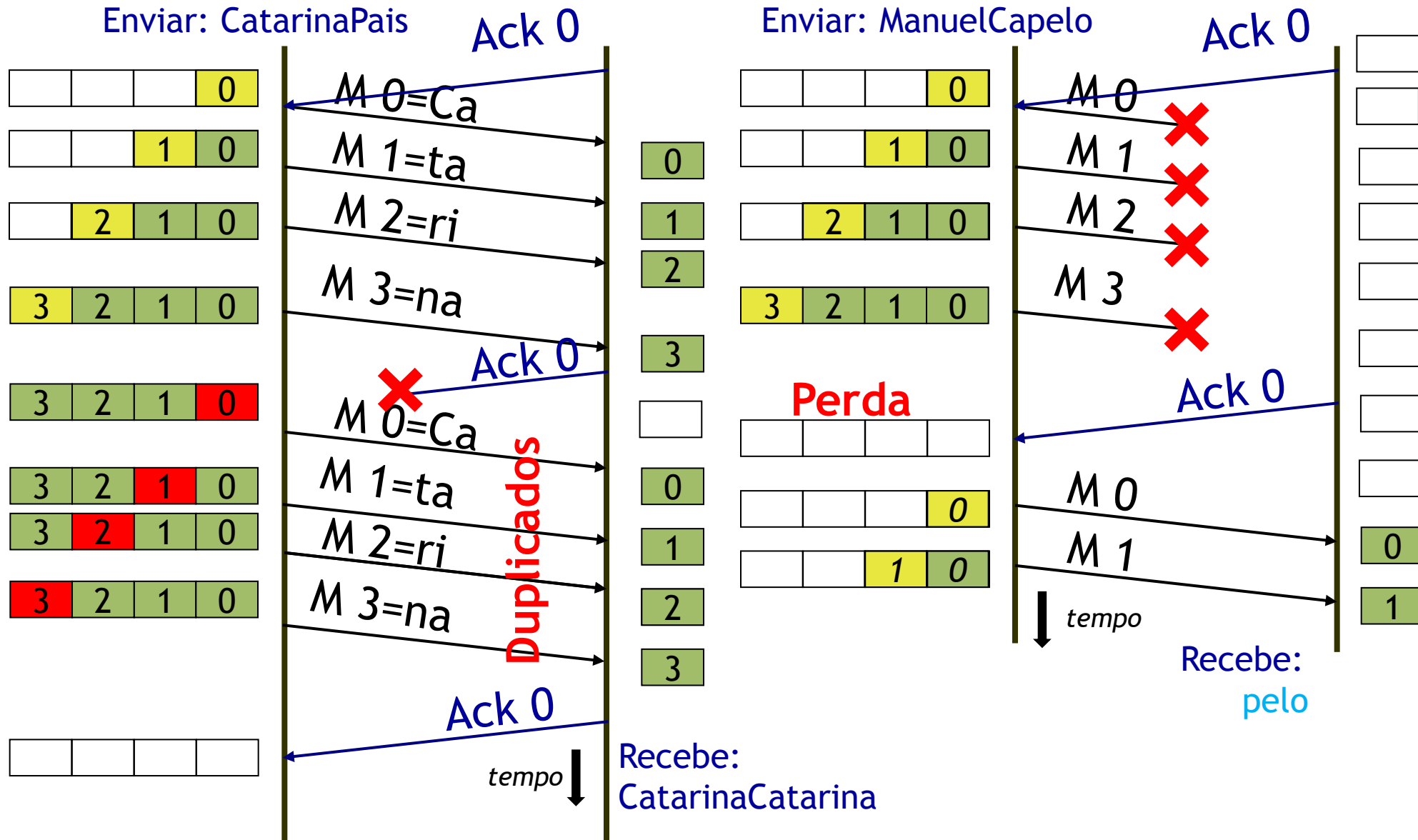
$$J_{tx} = N-1 \quad \checkmark$$

# Limite da janela de Tx do Go-Back-N



# Violação do limite da janela de $tx$ Go-Back-N

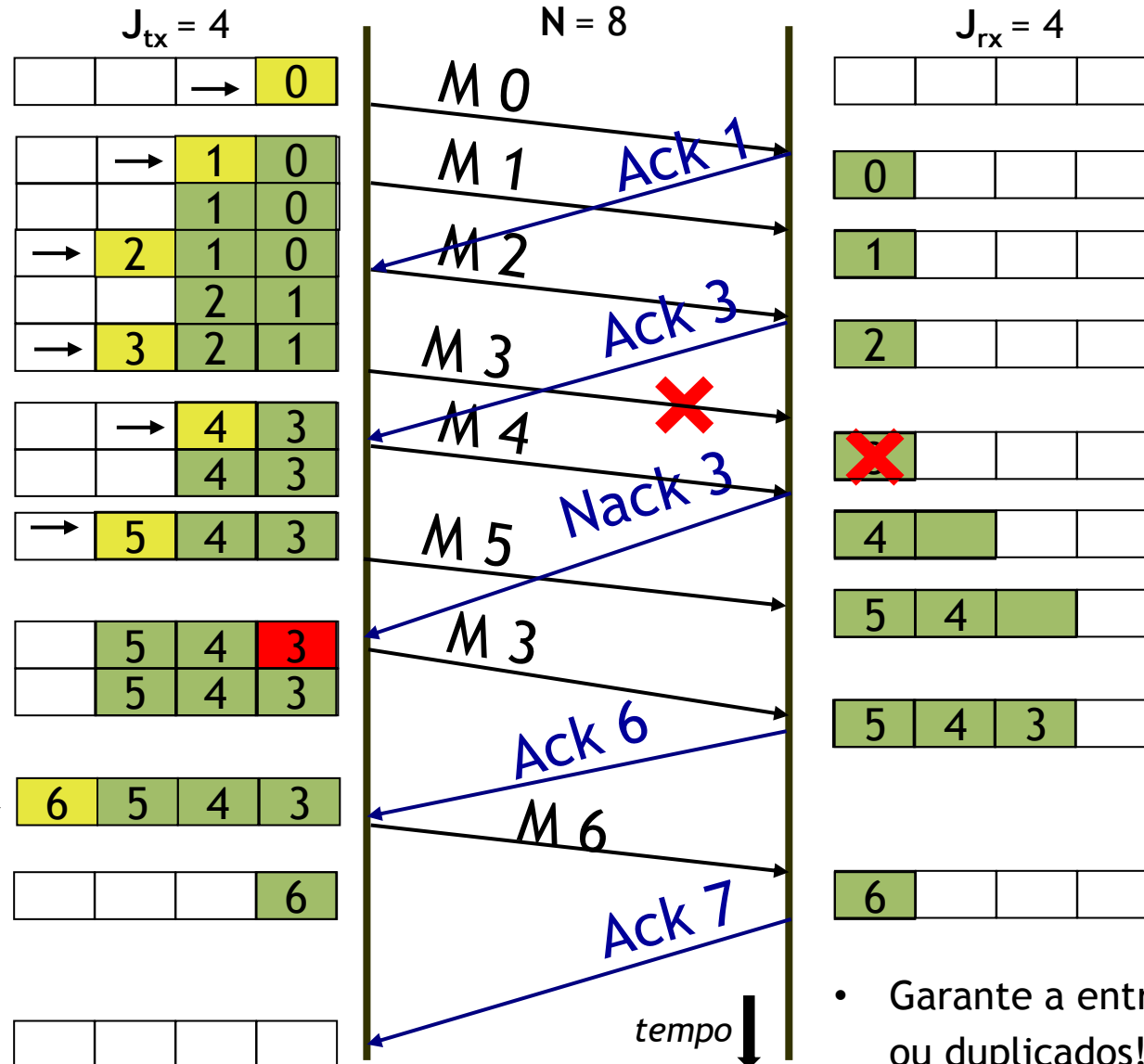
$$J_{tx} = N \times$$



# ARQ: Protocolo *Selective Repeat*

No protocolo GB-n a necessidade de retransmitir todas as tramas na janela  $tx$  desde a sinalizada como “errada/em falta” tem implicações negativas no seu desempenho.

Na indicação de erro apenas a trama sinalizada como “em falta/errada” é retransmitida!



Passa a trama para o nível de rede

Valor máximo para  $J_{tx}$ :  
 $J_{tx} \leq N/2$

Transmissão sem parar:

$$T_{RTT} < T_{txINF} \times J_{tx}$$

Desempenho

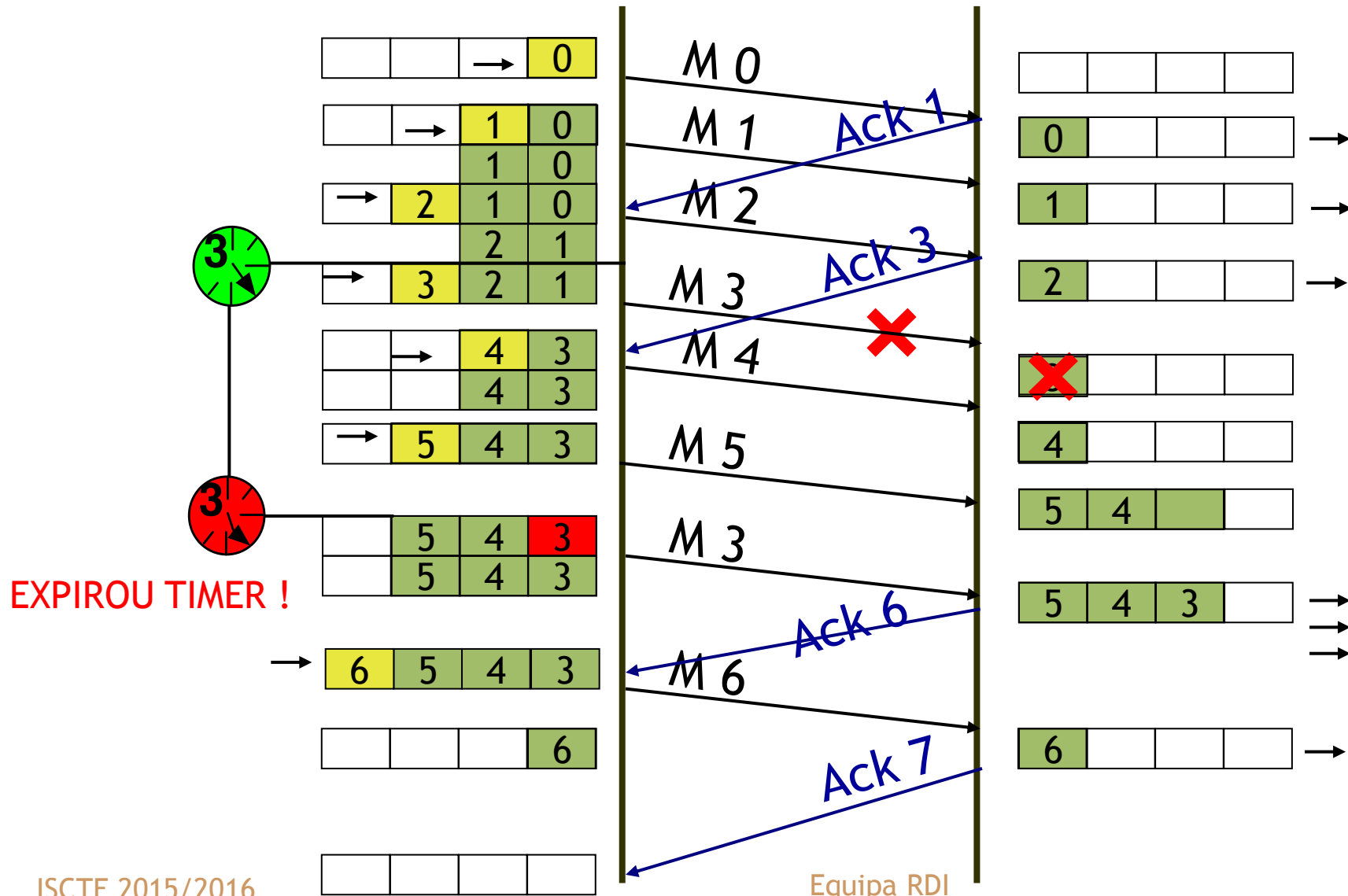
(sem erros):

$$U_{SR} = \begin{cases} 1, & \text{caso } T_{RTT} < T_{tx} \cdot J_{tx} \\ \frac{T_{tx} \cdot J_{tx}}{T_{RTT}}, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

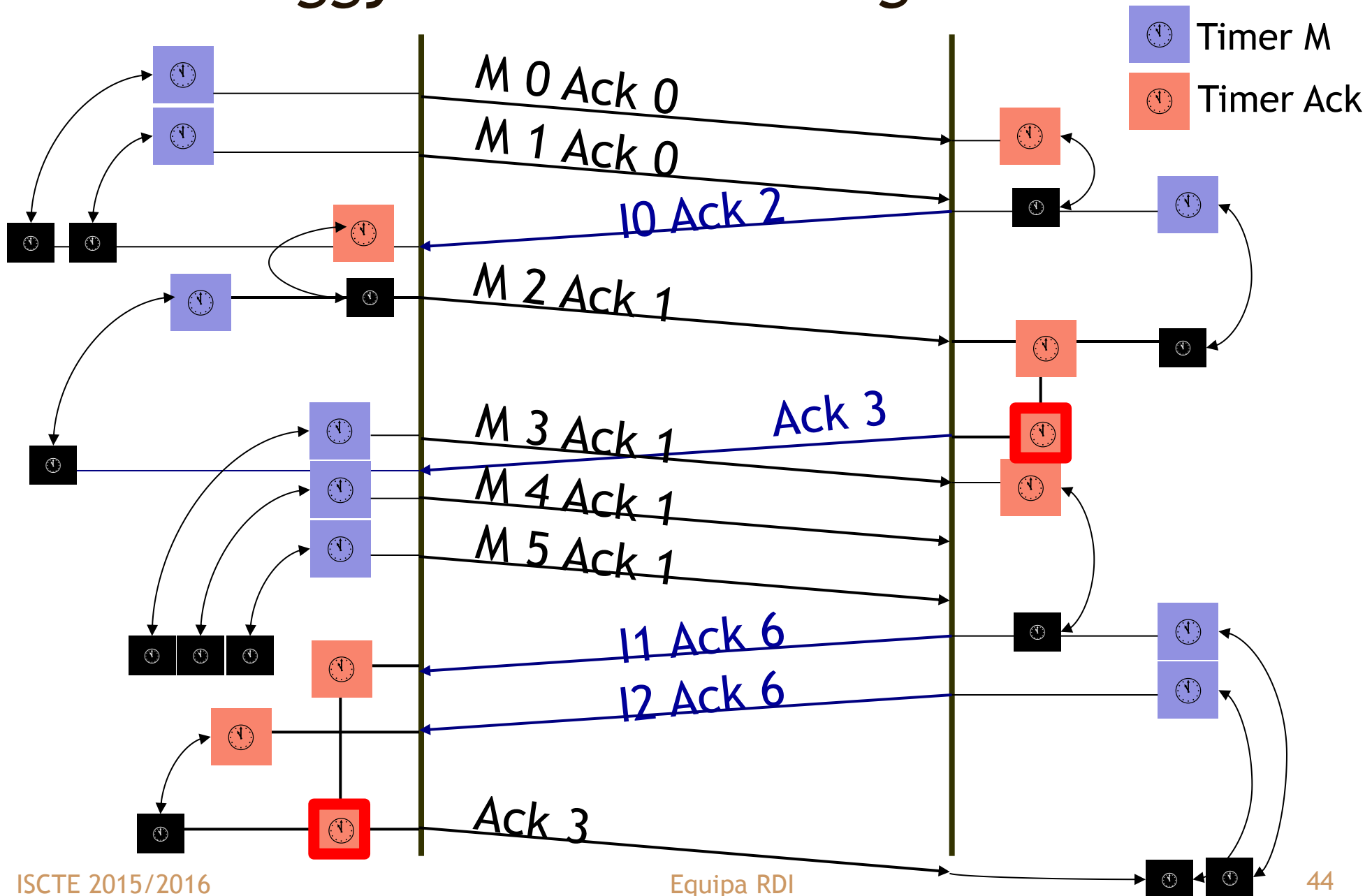
- Garante a entrega ordenada, sem falhas ou duplicados!

# Selective Repeat (variante com temporizador)

Usado conjuntamente com NACK o dimensionamento do *timer* é dinâmico e diferente do usado no S&W ou GB-N.

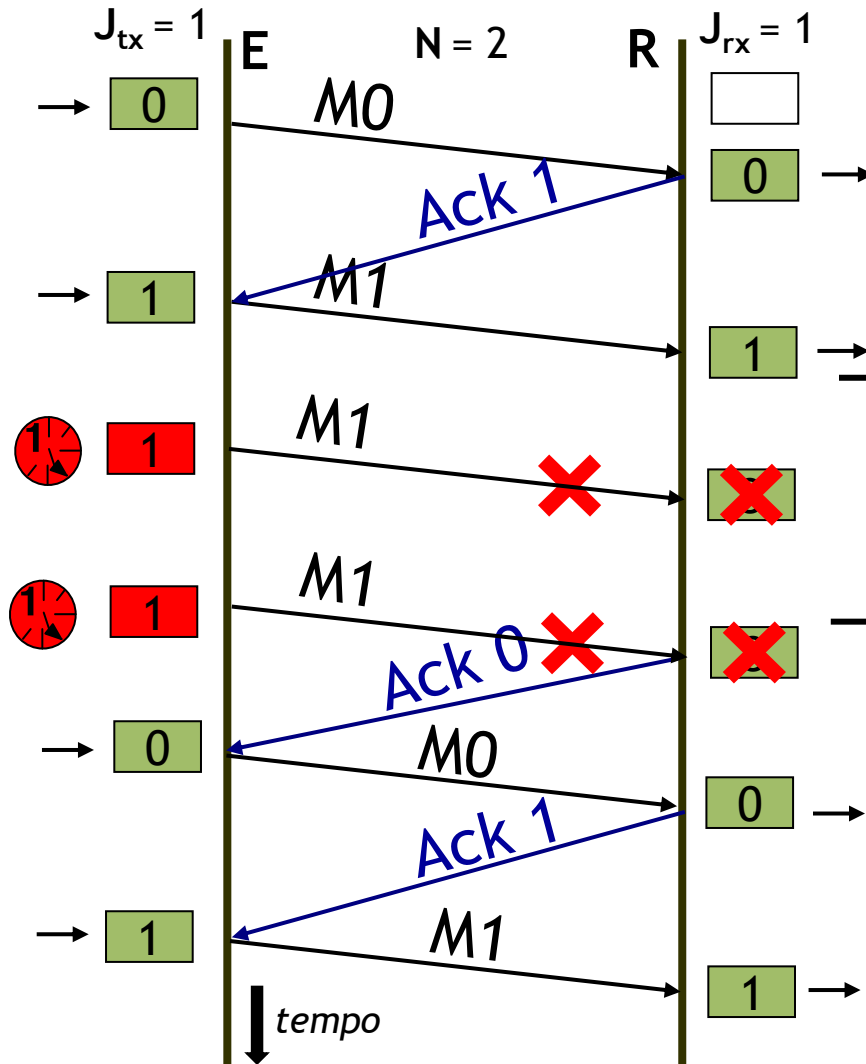


# Piggyback Acknowledgement



# Controlo de Fluxo

O receptor controla o ritmo a que o emissor envia tramas novas.



Enquanto o receptor pode receber tramas envia Ack ao emissor o que lhe permite enviar novas tramas.

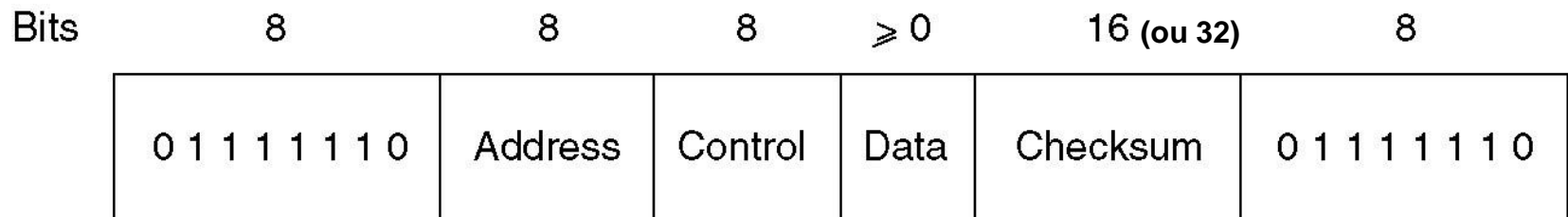
Quando o receptor não pode/prende receber tramas não envia Ack ao emissor.

O emissor passa apenas a retransmitir tramas que são descartadas pelo receptor.

Quando o receptor pretende receber novas tramas volta a enviar Ack ao emissor.

# High-Level Data Link Control - HDLC

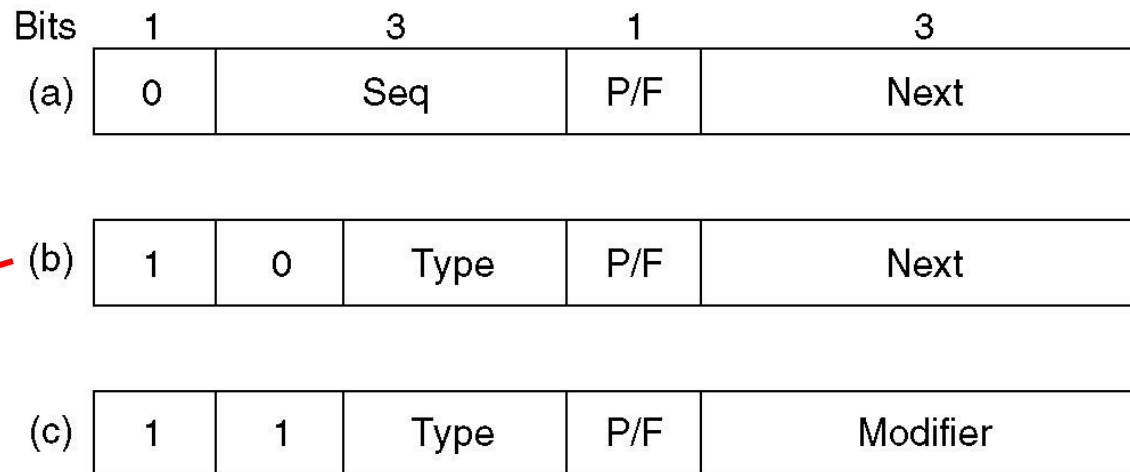
- Formato da trama



CRC-16-CCITT

$$G(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$$

- Campo de controlo



Trama de informação

Trama de supervisão

Trama não numerada

TYPE

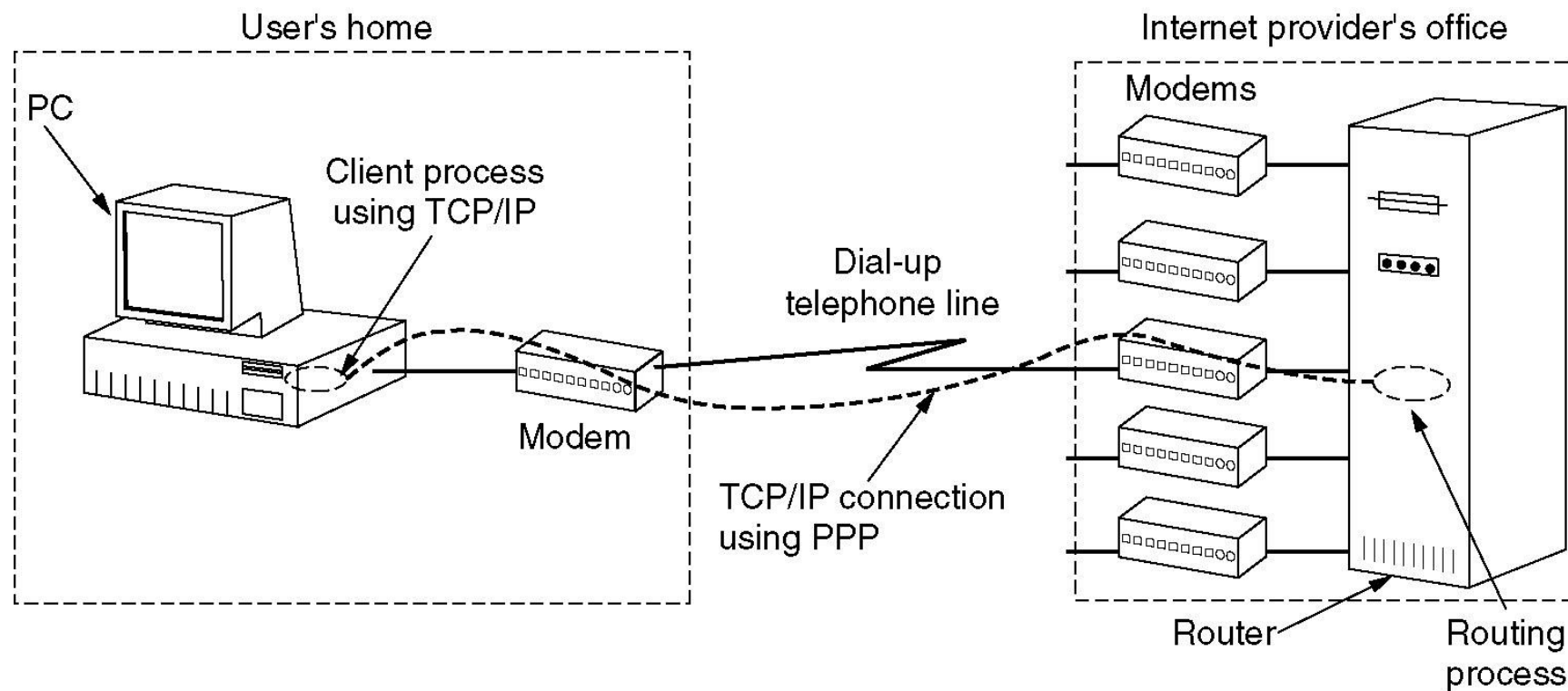
00 - ACK

01 - NACK

10 - RECEIVE NOT READY (confirma todas as tramas até Next, mas não quer receber mais)

11 - SELECTIVE REJECT (pede retransmissão da trama Next)

# O Nível de Ligação de Dados na Internet



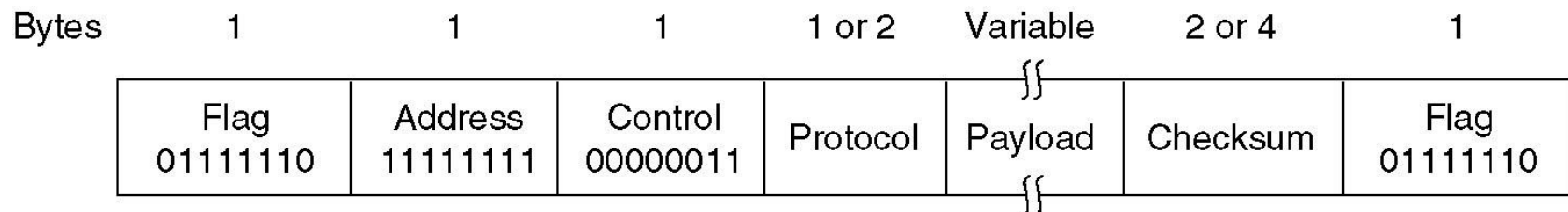


# PPP: Point-to-Point Protocol

- Delimitação de tramas e detecção de erros
- Gestão da ligação (Link Control Protocol - LCP):
  - Activa, testa, negoceia opções (e.g. checksum) e desactiva as ligações
- Negociação de opções do nível de Rede (Network Control Protocol - NCP), e.g., obtenção de um endereço IP.

**Protocol:** LCP, NCP, IP, IPX, etc.  
**Payload:** Max. 1500 bytes  
**Checksum:** depende de negociação

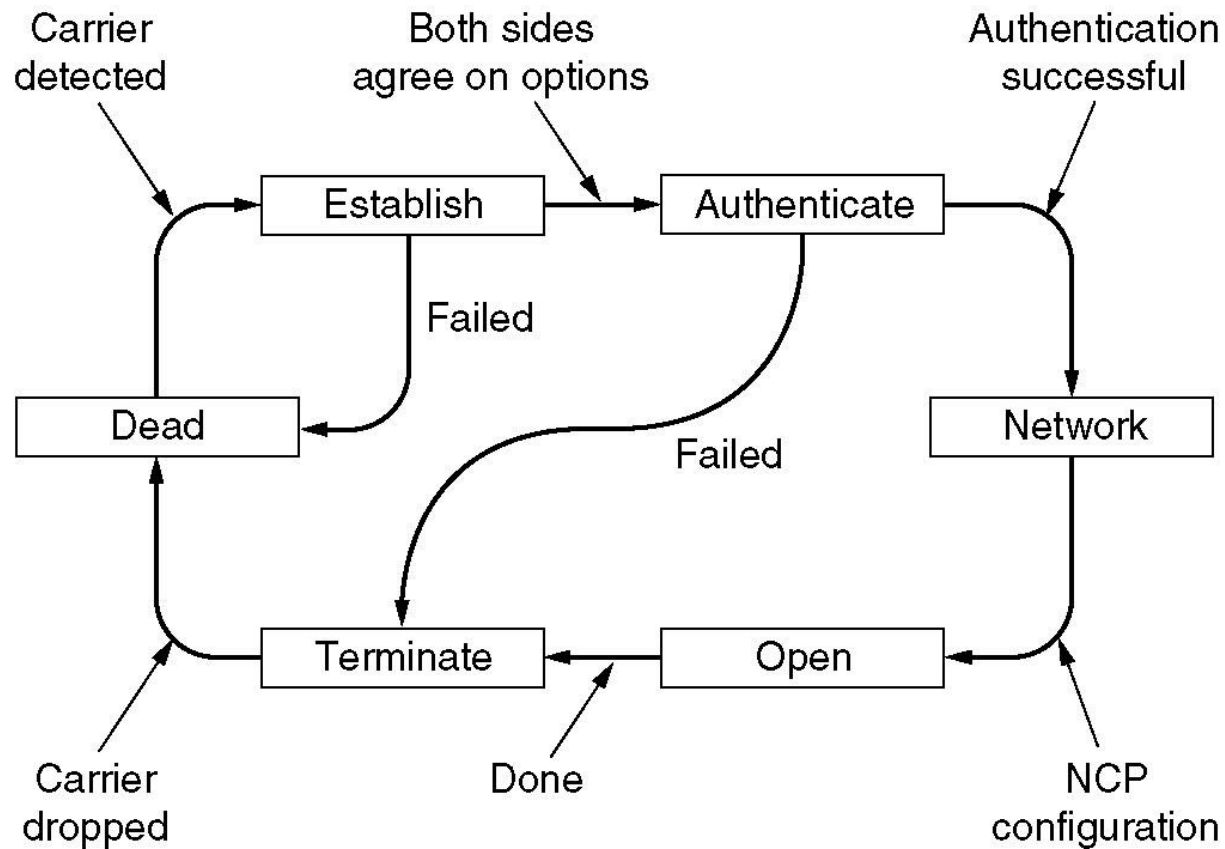
- Formato da trama:



Trama HDLC não numerada (**Nota:** ISO e IETF usam diferentes “byte order”)

## PPP: *Point-to-Point Protocol* (2)

Diagrama de estados para estabelecimento e fim de ligações



# Parte III: Nível de Ligação de Dados

- Bibliografia
  - Tanenbaum, 3.1-3.4
  - Stallings. 6.1-6.8, 7.1-7.5
- Séries de problemas
  - RDI: Série de problemas 4, 5.
- Questões de frequências e exames
  - Consultar sistema de e-learning
  - Realizar auto-avaliação