



POLITECNICO  
MILANO 1863

# Fondamenti di TELECOMUNICAZIONI

Prof. Marco Mezzavilla



POLITECNICO  
MILANO 1863

# Lezione 3 – Ritardi

# INDICE

## 3. RITARDI

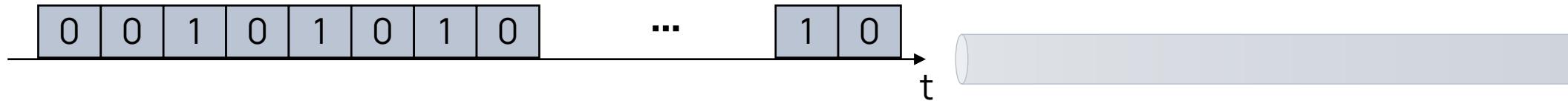
1. Tempo di attraversamento del canale
2. Store-and-Forward Vs. Cut-Through
3. Tempo di elaborazione e accodamento
4. Perdita di pacchetti

# TEMPO DI ATTRaversamento del canale

01

# Velocità di trasmissione

- È la velocità (o **rate**) **R** con la quale l'informazione digitale viene trasmessa su una linea
- È misurata in **bit/s** (o **bps**)
- È determinata dal mezzo trasmittivo e/o dalle interfacce

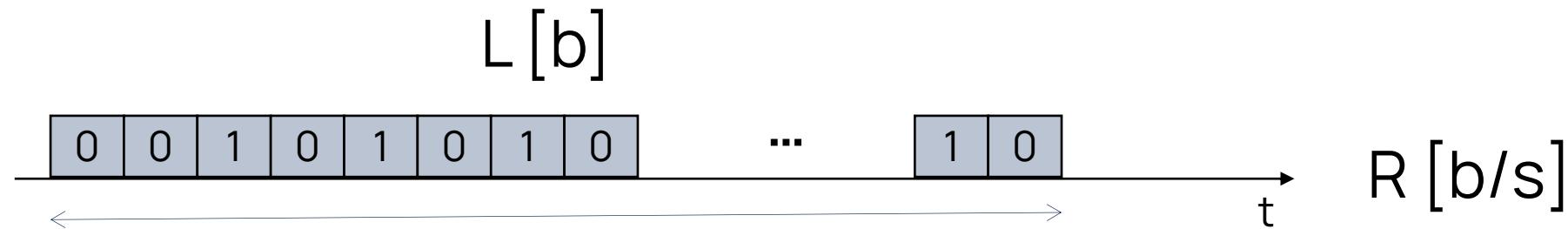


- **Unità di misura:**

1 <b>kbps</b> (kb/s) = $10^3$ bps	1 <b>Byte</b> = 8 bit
1 <b>Mbps</b> (Mb/s) = $10^6$ bps	1 <b>kB</b> = $10^3$ B
1 <b>Gbps</b> (Gb/s) = $10^9$ bps	1 <b>MB</b> = $10^6$ B
	1 <b>GB</b> = $10^9$ B

# Tempo di trasmissione

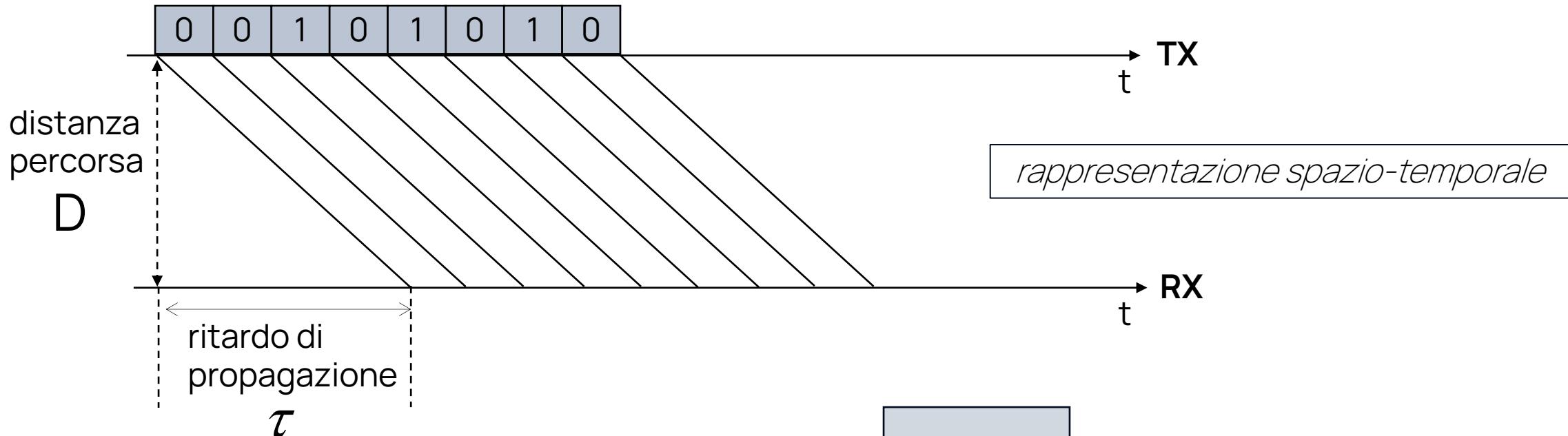
- Il tempo  $T$  per trasmettere  $L$  bits dipende dalla velocità di trasmissione  $R$



- Formula per calcolare il tempo di trasmissione:
- $$T = \frac{L}{R} \quad [b]/[b/s] = [s]$$

# Ritardo di propagazione

- Il tempo  $\tau$  affinché un impulso trasmesso dal trasmettitore TX raggiunga il ricevitore RX dipende dalla distanza  $D$  (in m) e dalla velocità di propagazione  $v$  (in m/s)

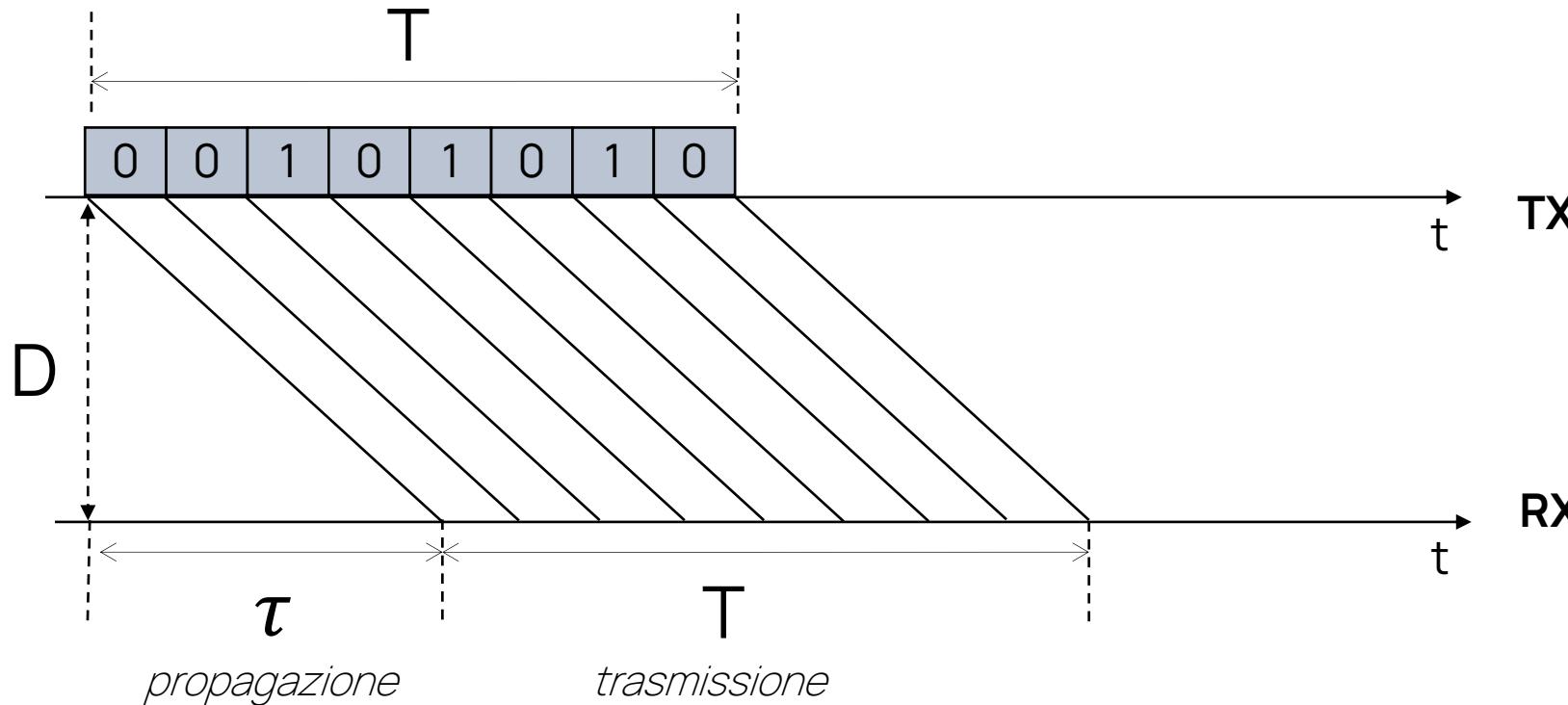


- Formula per calcolare il ritardo di propagazione:

$$\tau = \frac{D}{v}$$

$$[m]/[m/s] = [s]$$

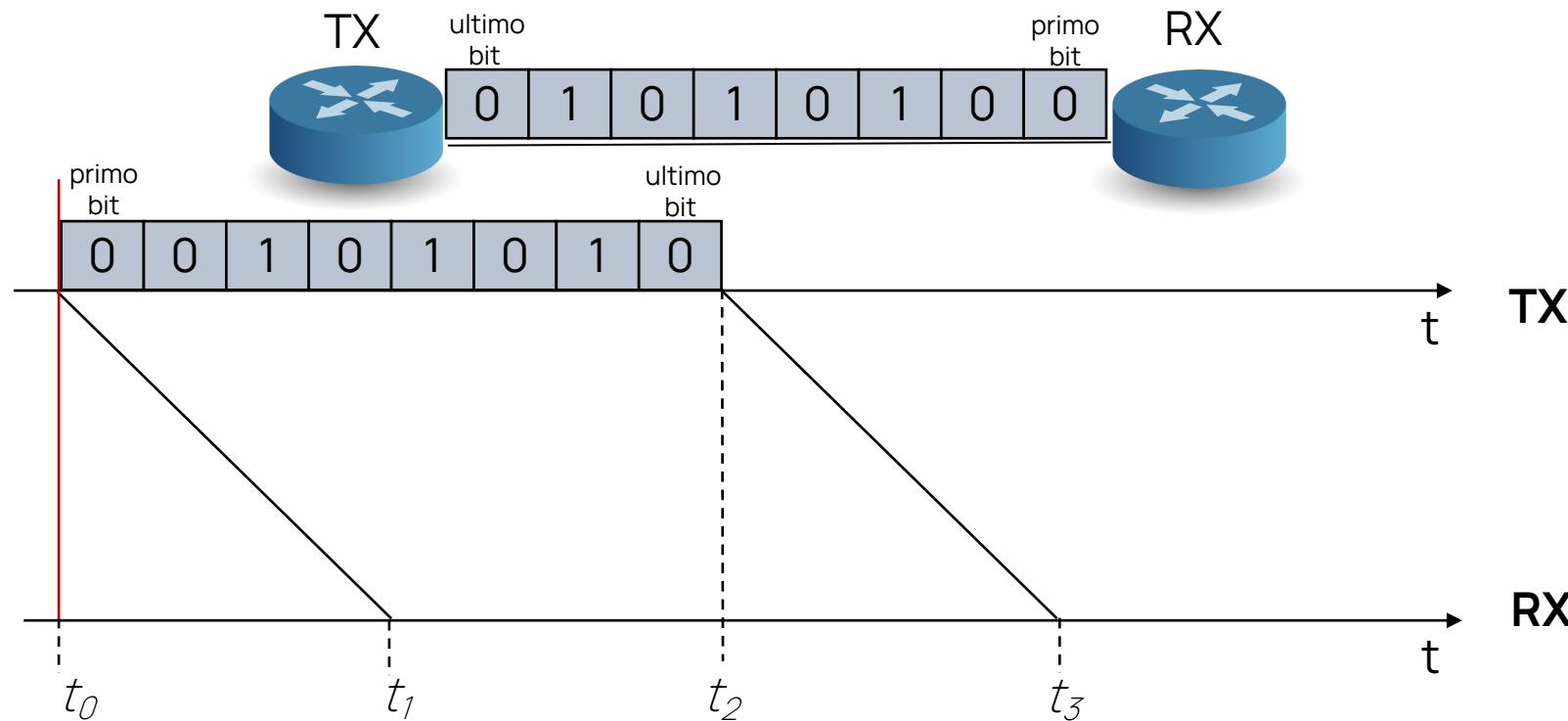
# Tempo di attraversamento del canale



- Ritardo fra la trasmissione del primo bit e la ricezione dell'ultimo:

$$T_{tot} = T + \tau$$

# Tempo di attraversamento del canale



$t_0$  = inizio trasmissione

$t_1$  = arrivo primo bit

$t_2$  = fine trasmissione

$t_3$  = arrivo ultimo bit

## Tempo di trasmissione:

$$T = t_2 - t_0 = t_3 - t_1 = L/R \quad L = \text{lunghezza del pacchetto [bit]}$$

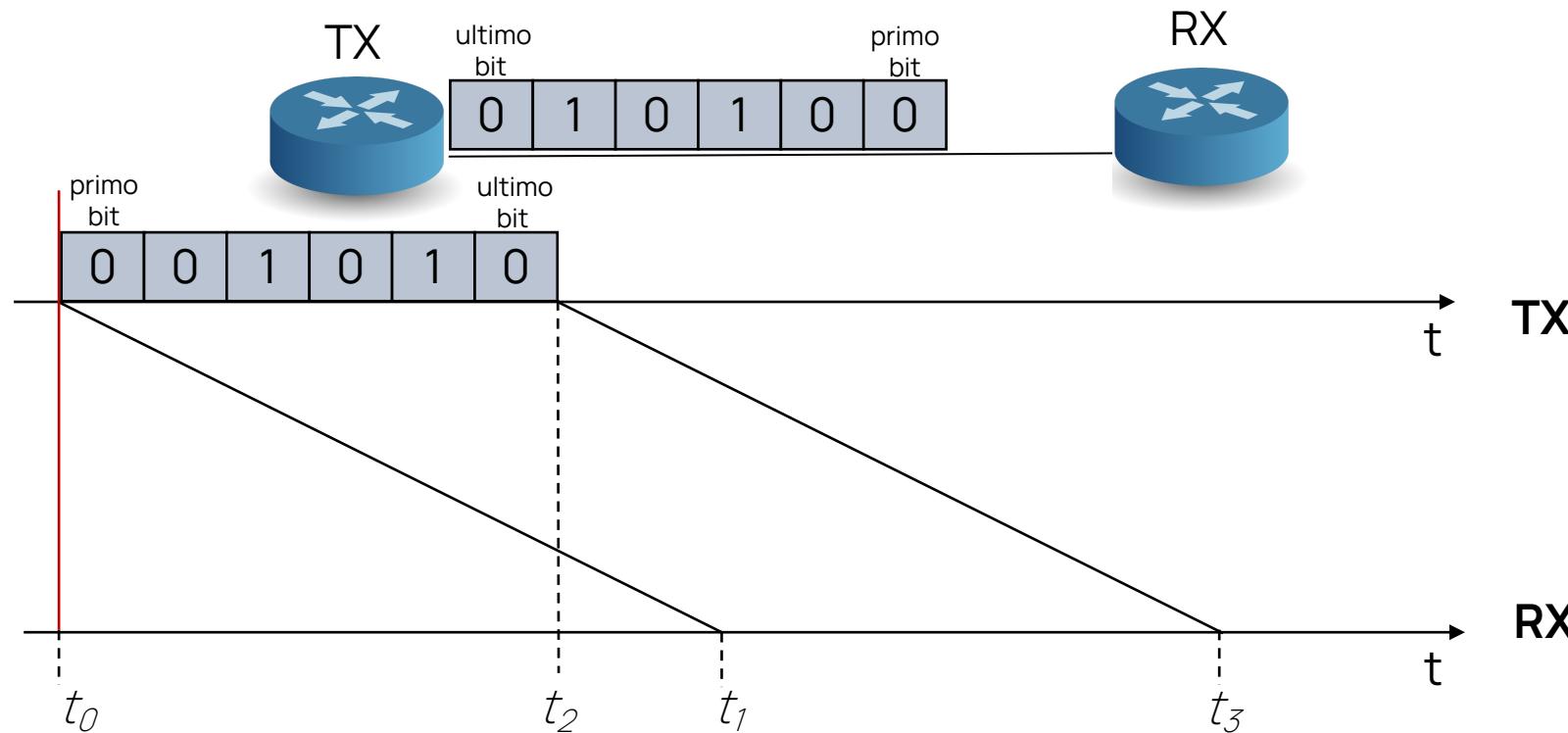
$$R = \text{velocità di trasm. [bit/s]}$$

## Ritardo di propagazione:

$$t = t_1 - t_0 = t_3 - t_2 = D/V \quad D = \text{lunghezza del coll. [m]}$$

$$V = \text{velocità di prop. [m/s]}$$

# Tempo di attraversamento del canale



$t_0$  = inizio trasmissione

$t_1$  = arrivo primo bit

$t_2$  = fine trasmissione

$t_3$  = arrivo ultimo bit

## Tempo di trasmissione:

$$T = t_2 - t_0 = t_3 - t_1 = L/R \quad L = \text{lunghezza del pacchetto [bit]}$$

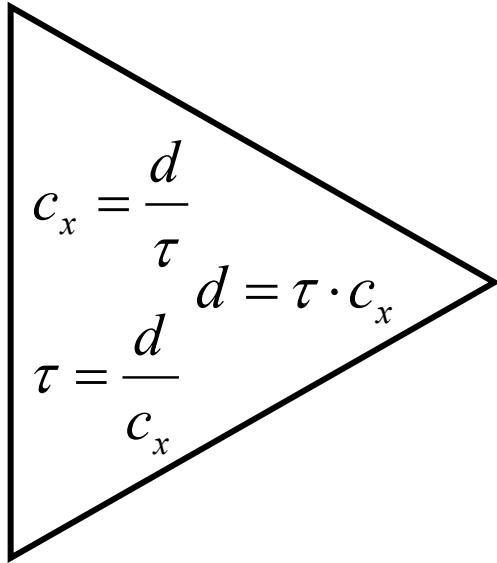
$$R = \text{velocità di trasm. [bit/s]}$$

## Ritardo di propagazione:

$$t = t_1 - t_0 = t_3 - t_2 = D/V \quad D = \text{lunghezza del coll. [m]}$$

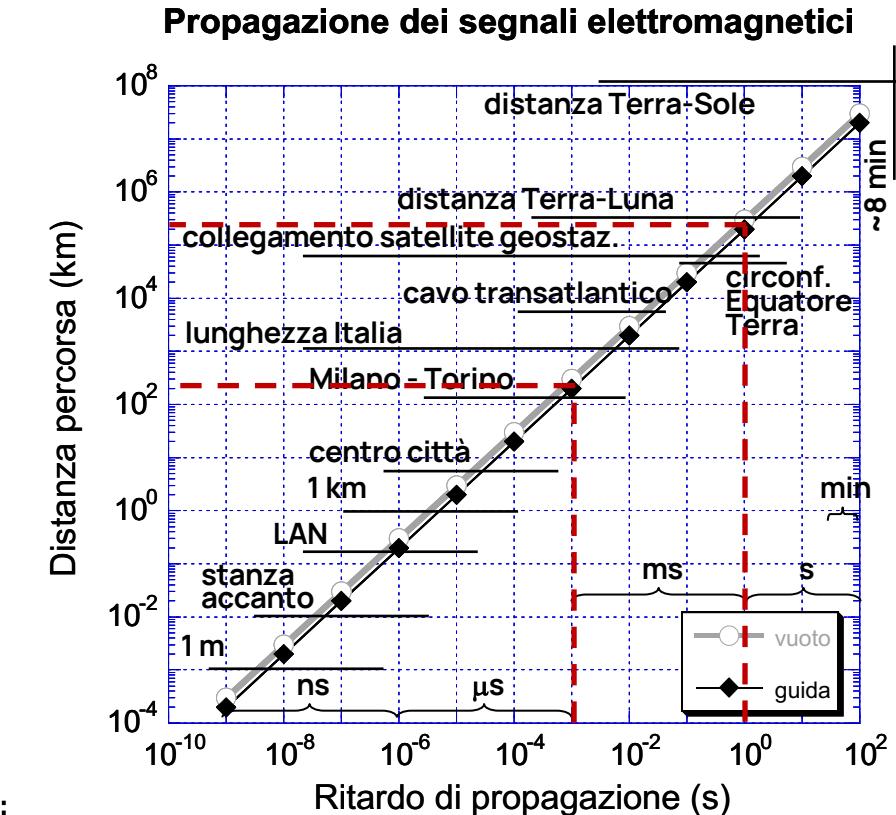
$$V = \text{velocità di prop. [m/s]}$$

# Primo “triangolo magico”



- $c_x$  = Velocità di propagazione dei segnali elettromagnetici
  - Propagazione libera (onde radio, vuoto, aria):  $c_0 \cong 300000 \text{ km/s}$
  - Propagazione guidata (cavi in rame, fibra ottica, guide d'onda):  $c_g \cong 200000 \text{ km/s}$
- $d$  = distanza percorsa [km]
- $\tau$  = ritardo di propagazione [s]

$c_0/n$ , dove  $n$  è l'indice di rifrazione  
 $n \cong 1.5$  nella fibra (nucleo)  
 $n \cong 1.3-2.3$  nei cavi in rame ( $\sqrt{\epsilon_r \mu_r}$ :  $\epsilon_r$  permittività,  $\mu_r$  permeabilità)



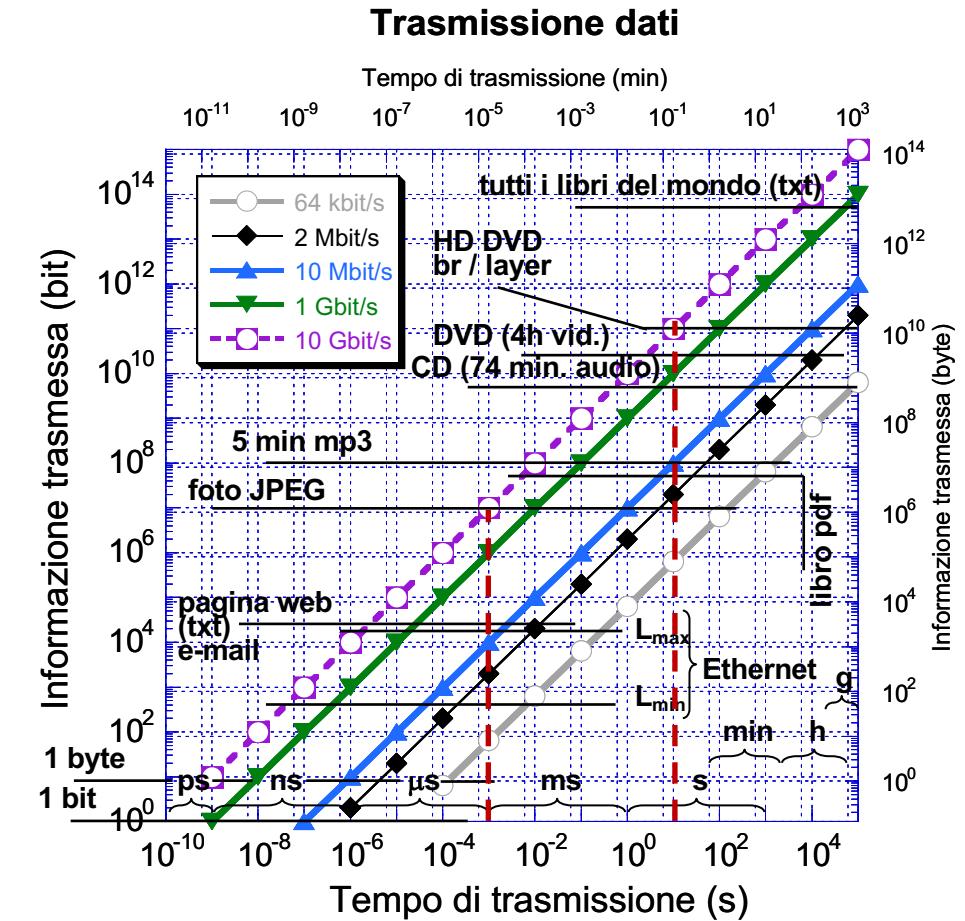
# Secondo “triangolo magico”

$$\begin{array}{l} C = \frac{L}{T} \\ L = T \cdot C \\ T = \frac{L}{C} \end{array}$$

$$T_{\text{tot}} = T + \tau$$

*tempo totale di  
attraversamento del canale*

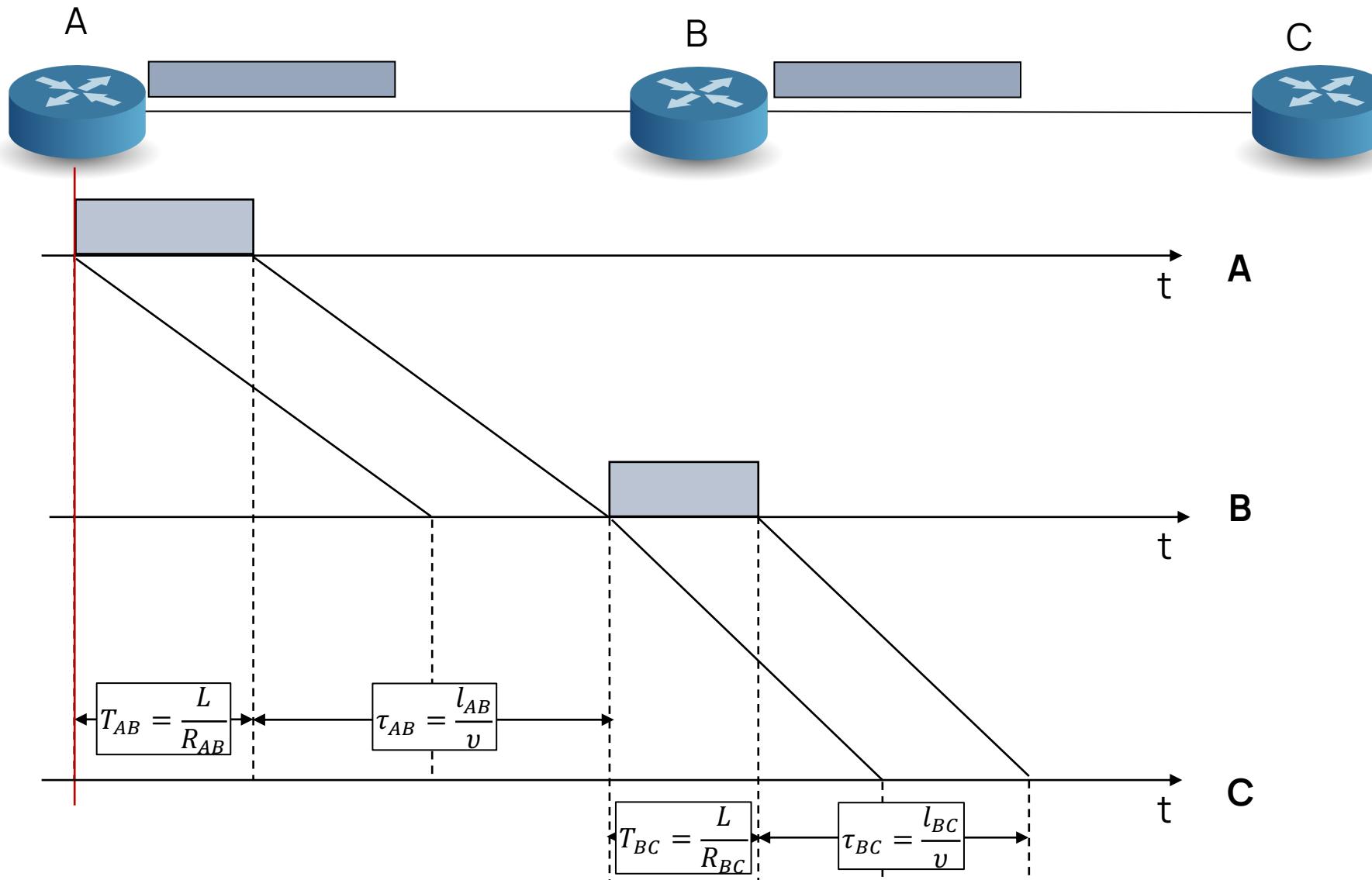
- **C** = Velocità di trasmissione della sorgente [bit/s]
- **L** = quantità d'informazione [bit]
- **T** = tempo di trasmissione [s]



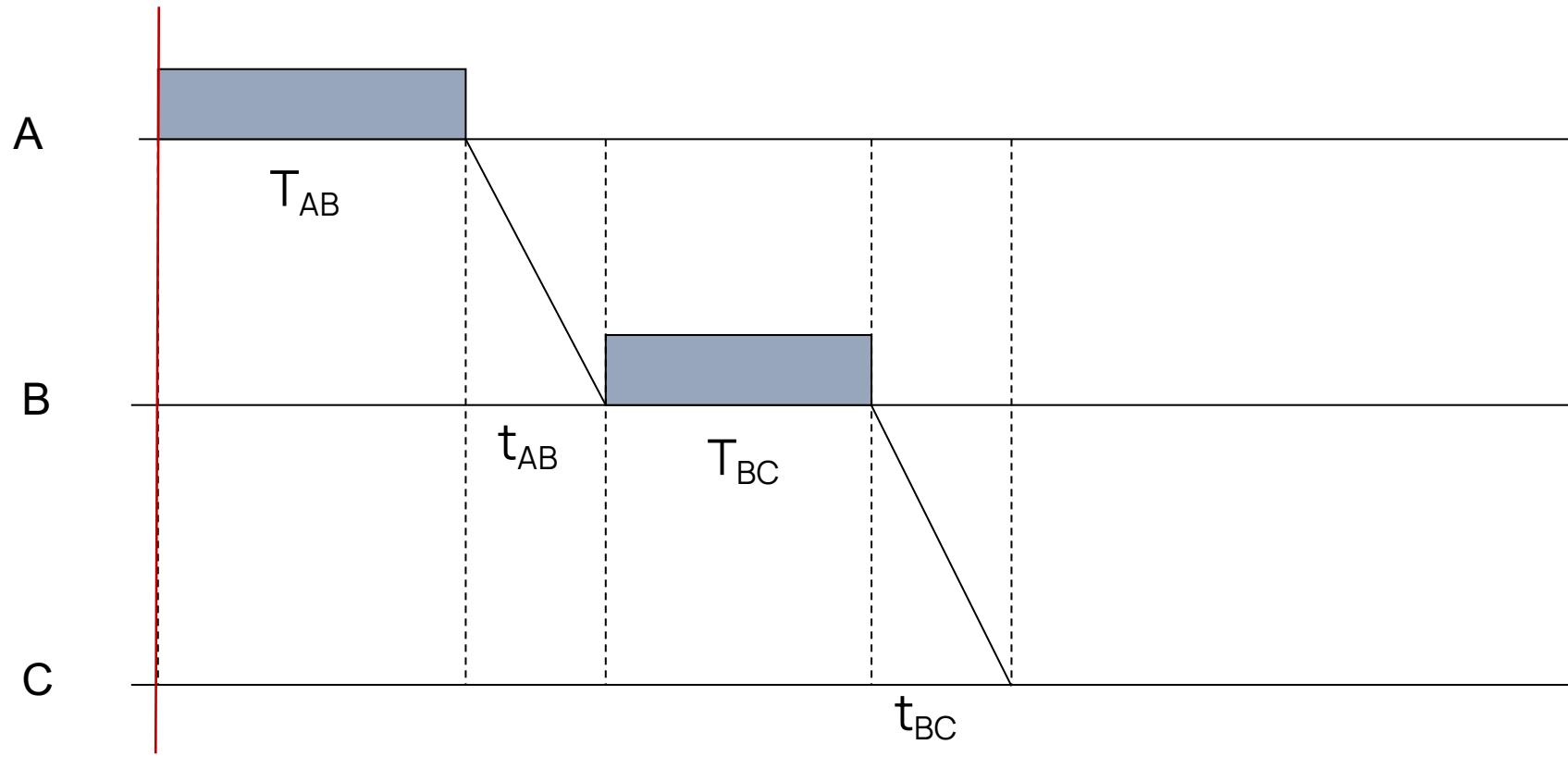
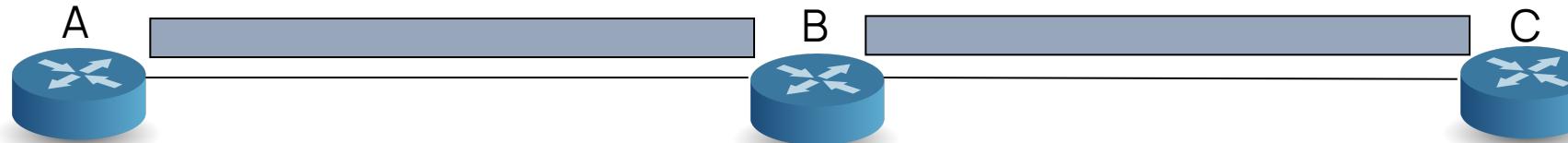
# STORE-AND-FORWARD VS. CUT-THROUGH

02

# Store-and-forward

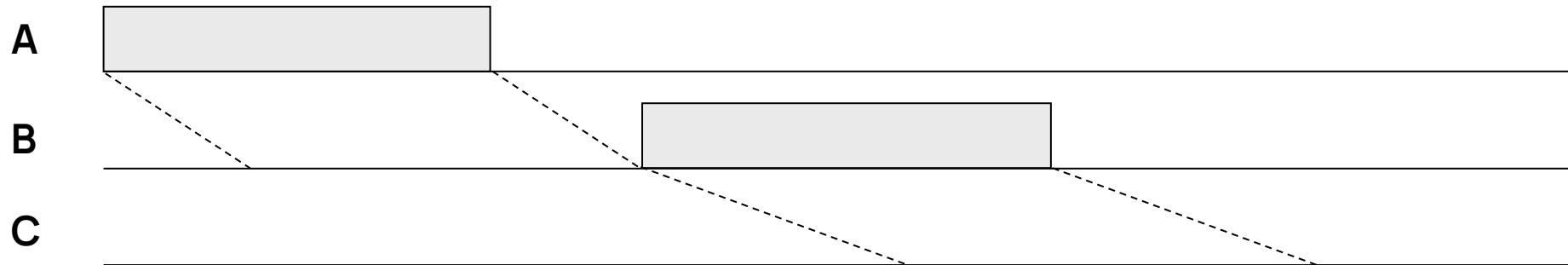


# Store-and-forward

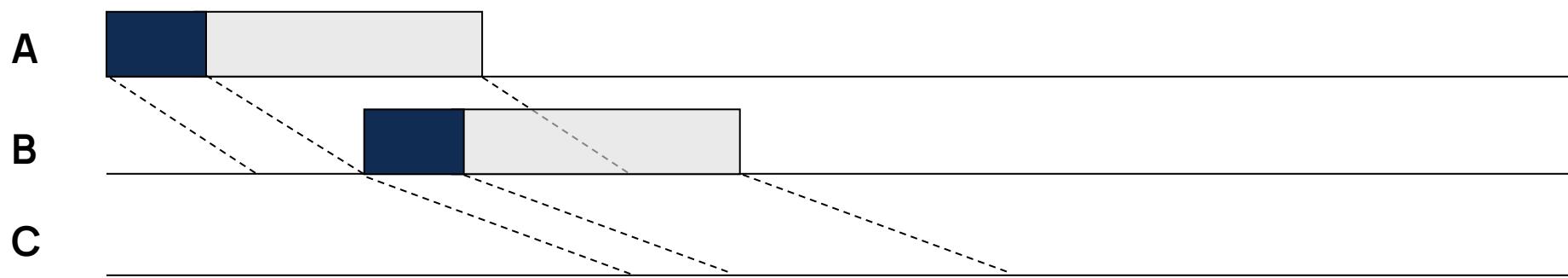


# Cut-Through

- *Store-and-forward*: il pacchetto deve essere completamente ricevuto prima di essere ritrasmesso



- *Cut-Through*: il pacchetto viene ritrasmesso alla completa ricezione dell'header



# Cut-Through

## □ Vantaggi:

- Velocità, bassa latenza

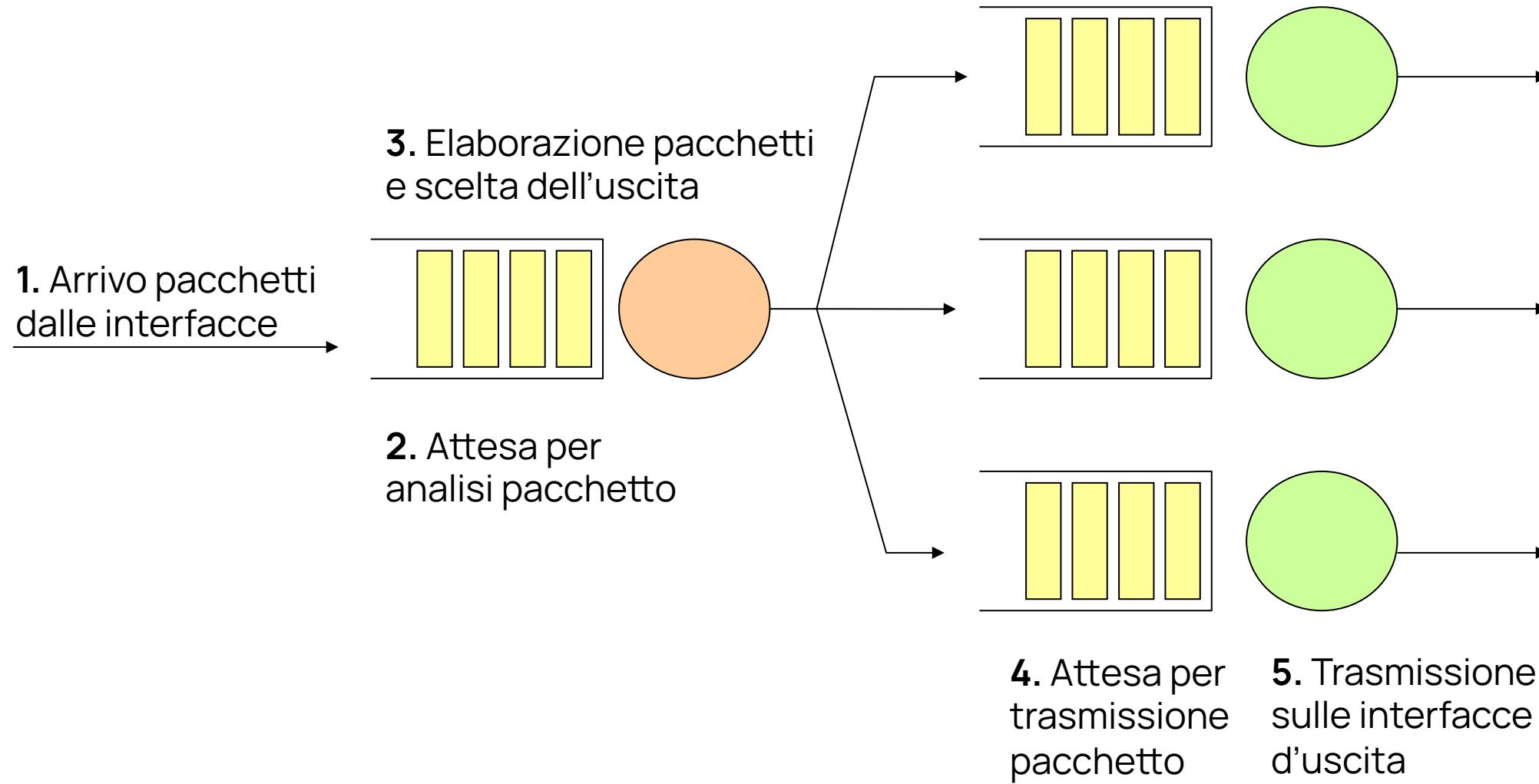
## □ Svantaggi:

- Propagazione di errori:
  - Dato che quest'approccio preclude la possibilità di controllare se ci sono errori (CRC), pacchetti erronei occuperanno risorse per poi essere scartati..
  - Link con velocità diverse creano inefficienze (l'interfaccia più veloce trasmette il pacchetto prima che sia stato ricevuto completamente)

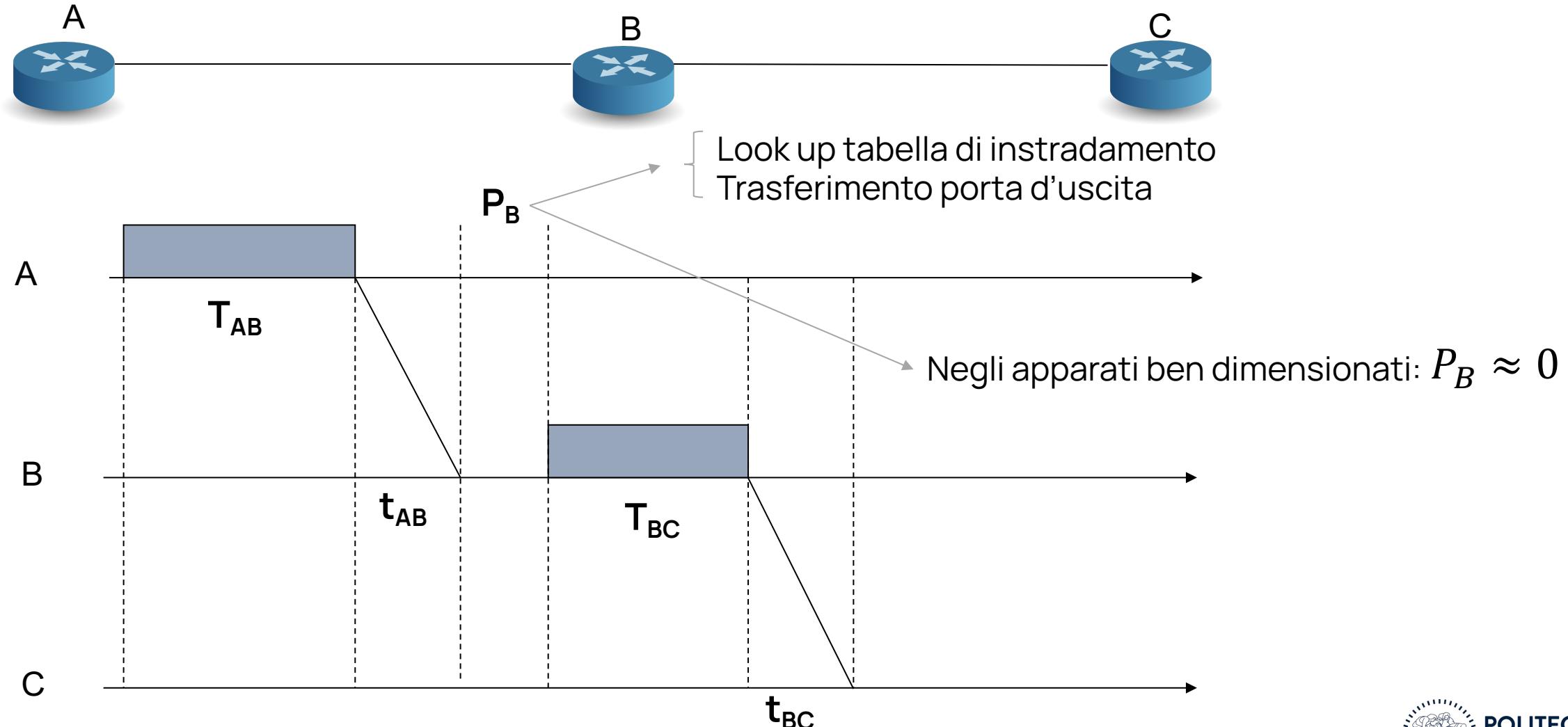
# TEMPO DI ELABORAZIONE E ACCODAMENTO

03

# Modello di un nodo



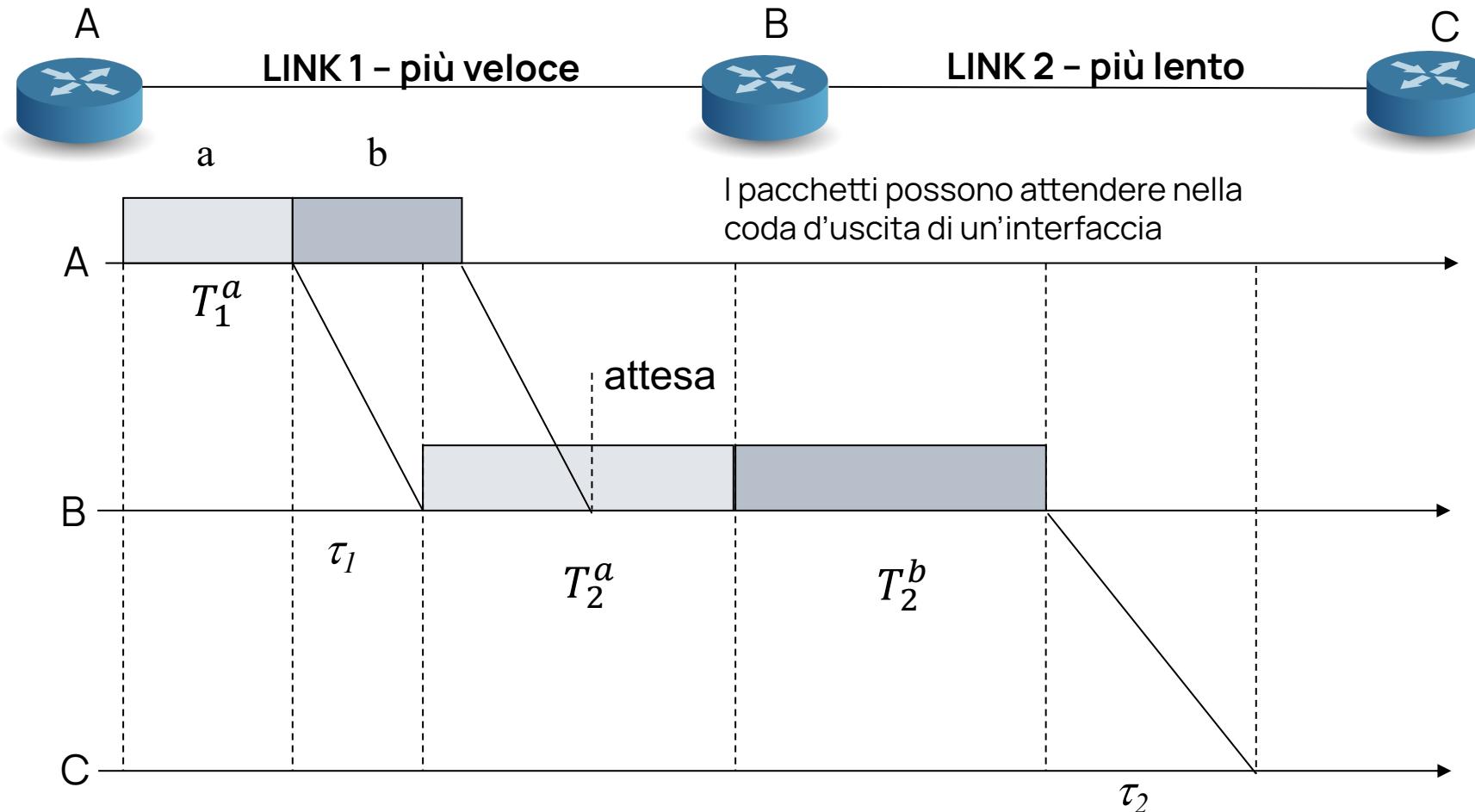
# Tempo di elaborazione



# Ritardo di accodamento

## ESEMPIO 1

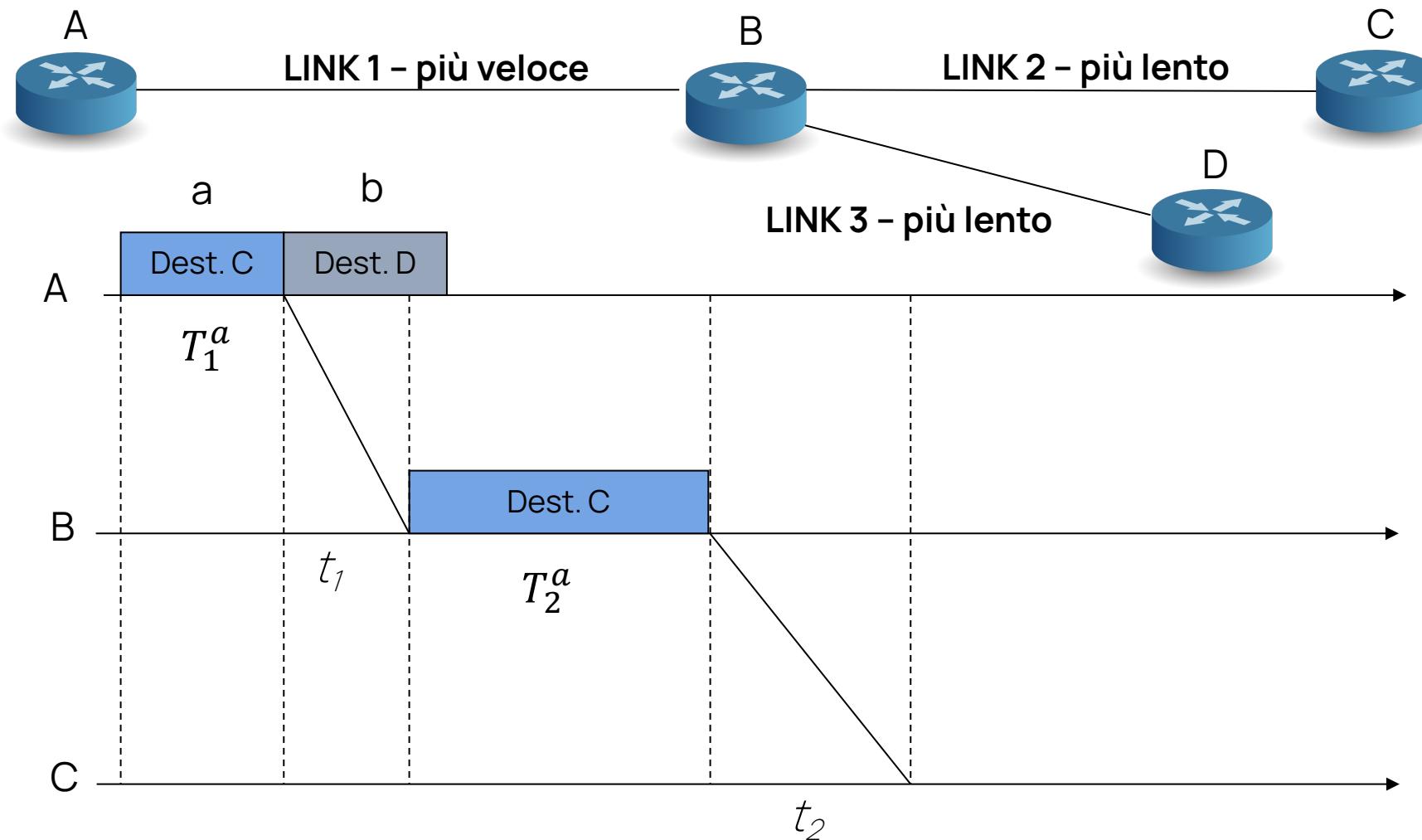
- Se la linea di uscita è occupata occorre aspettare in coda



# Ritardo di accodamento

## ESEMPIO 2

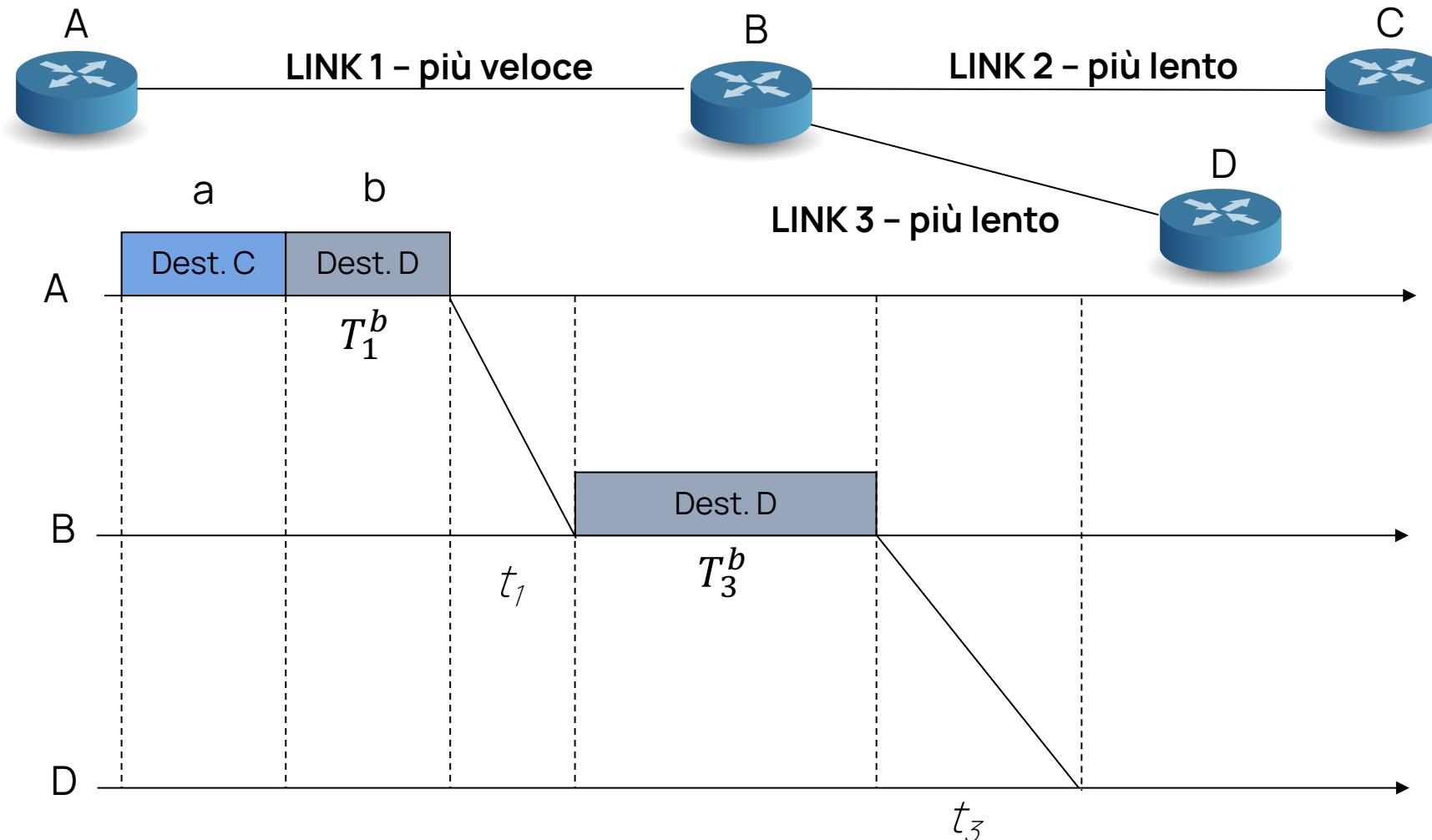
- Interfacce diverse hanno code d'uscita separate ed indipendenti



# Ritardo di accodamento

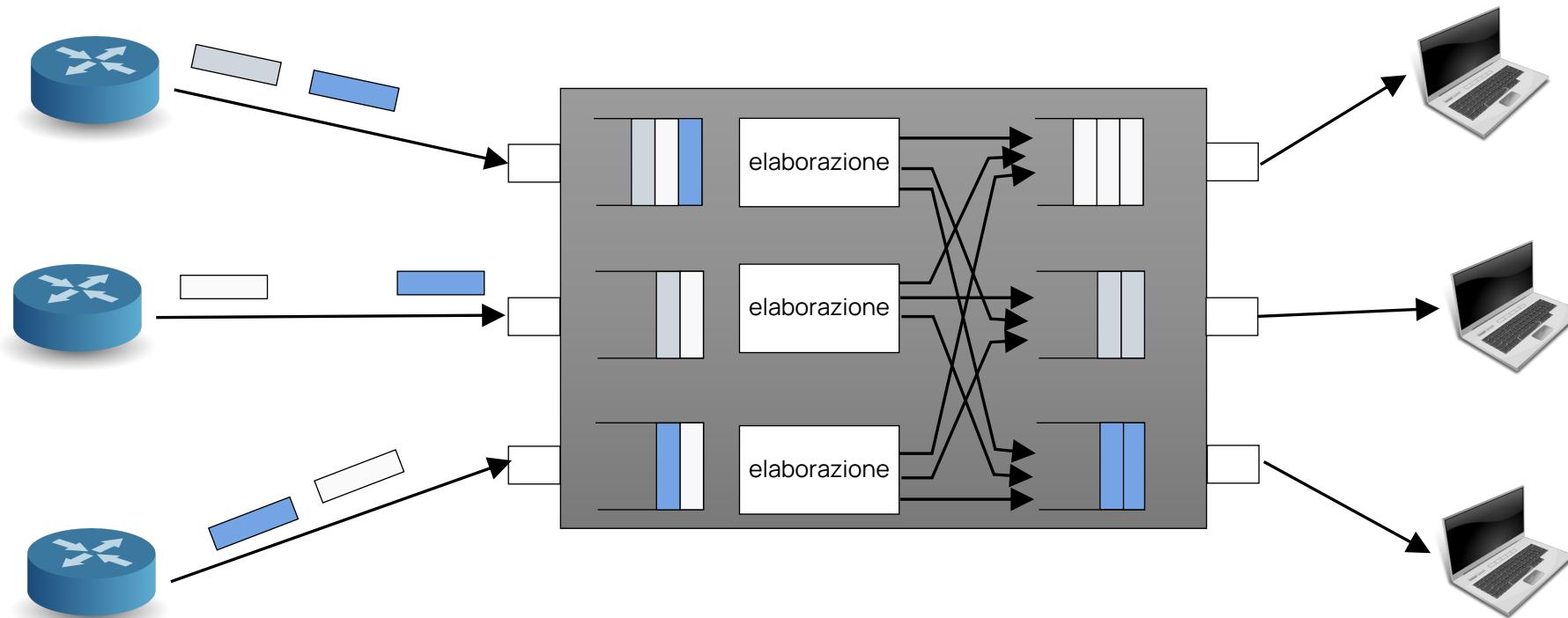
## ESEMPIO 2 (cont.)

- Interfacce diverse hanno code d'uscita separate ed indipendenti



# Ritardo di accodamento

- **MULTIPLAZIONE STATISTICA:** Più in generale il ritardo di accodamento dipende dalla multiplazione statistica dovuto all'arrivo asincrono dei pacchetti alle code d'uscita (trasmissione)

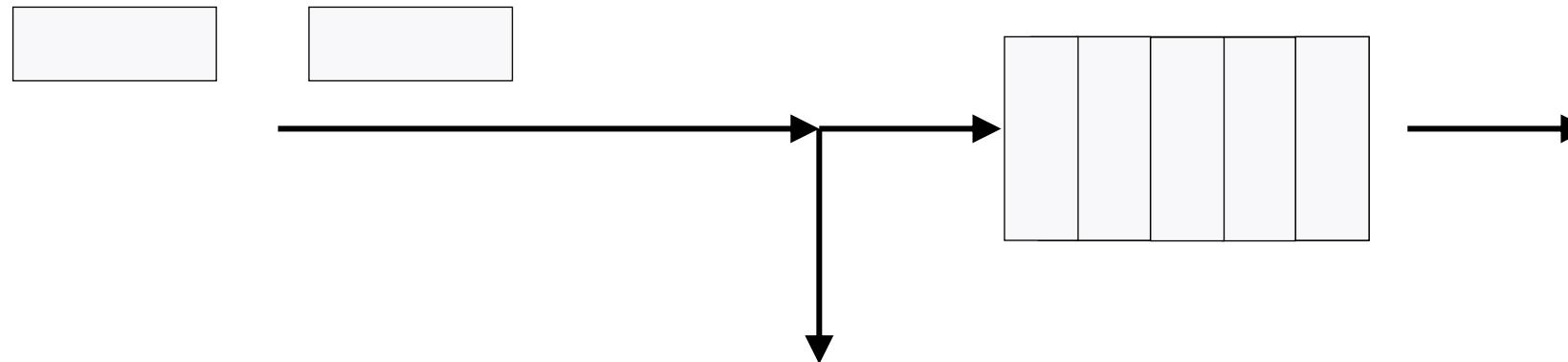


# PERDITA DI PACCHETTI

04

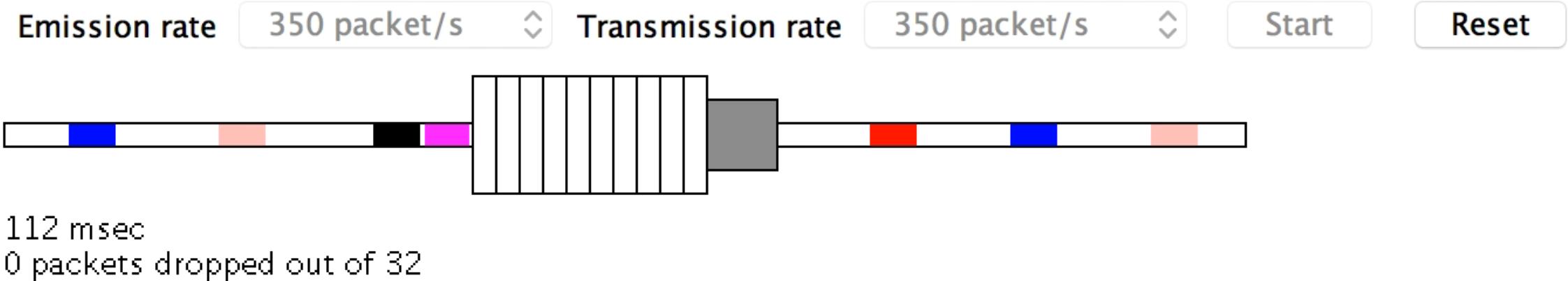
# Perdita di pacchetti

- ❑ Le code hanno dimensioni limitate
- ❑ In congestione (coda piena) i pacchetti che arrivano vengono scartati
- ❑ I pacchetti persi possono essere ritrasmessi o meno a seconda del livello/protocollo che gestisce l'evento di perdita (vedremo esempi a livello di linea e di trasporto).



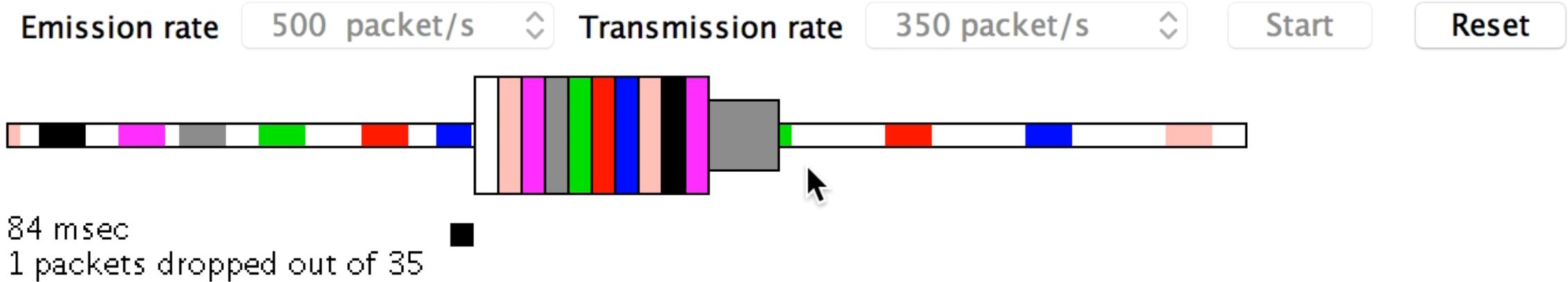
# Perdita di pacchetti

- Perdita di pacchetto lenta nel caso in cui due collegamenti abbiano la stessa velocità di trasmissione



# Perdita di pacchetti

- Perdita di pacchetto immediata nel caso in cui un collegamento sia più lento rispetto al collegamento precedente



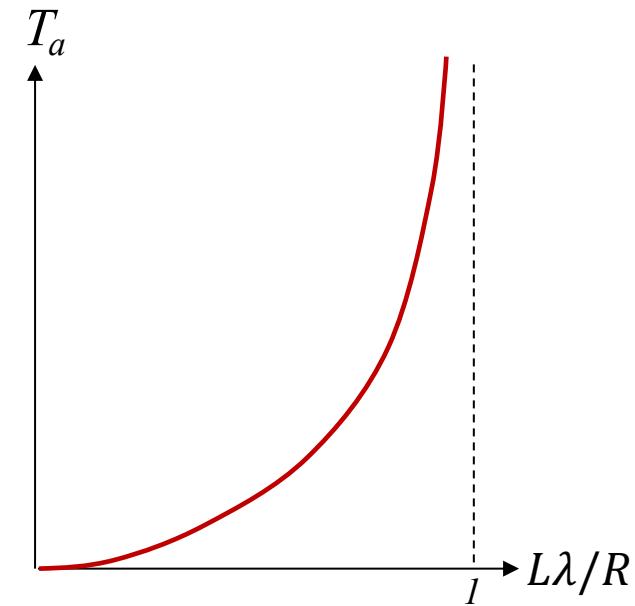
# Teoria delle code

- Del ritardo di accodamento medio  $T_a$  si possono fare dei modelli statistici basati sulla teoria delle code

- $R$  = velocità del link [b/s]
- $L$  = lunghezza pacchetto [bits]
- $\lambda$  = frequenza di arrivo dei pacchetti [pack/s]

$$\text{Intensità di traffico} = L\lambda/R$$

- $L\lambda/R \rightarrow 0$ : ritardo in coda piccolo
- $L\lambda/R \rightarrow 1$ : ritardo tendente all'infinito



# Teoria delle code

- Del ritardo di accodamento medio  $T_a$  si possono fare dei modelli statistici basati sulla teoria delle code

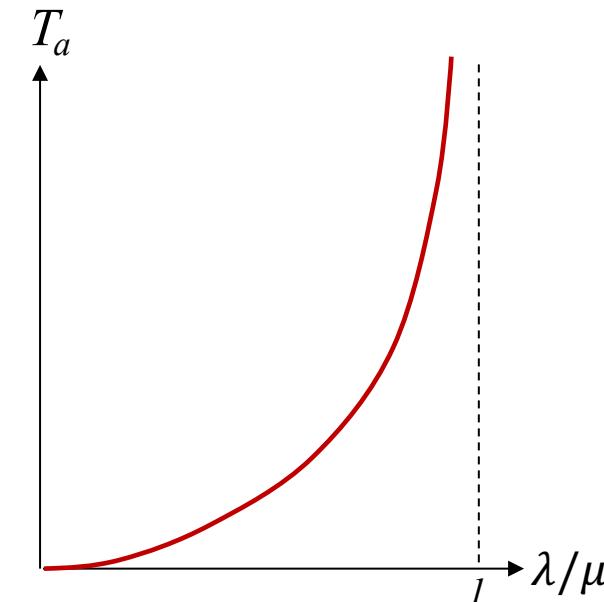
- $R$  = velocità del link [b/s]
- $L$  = lunghezza pacchetto [bits]
- $\lambda$  = frequenza di arrivo dei pacchetti [pack/s]

- Definiamo:

$\mu$  = frequenza di trasmissione dei pacchetti [pack/s]

$$\text{Si ha: } \mu = \frac{R}{L}$$

Si può mostrare che sotto alcuni condizioni sulla statistica degli arrivi e la distribuzione delle lunghezze dei pacchetti:



$$T_a = \frac{1}{\mu - \lambda} - \frac{1}{\mu}$$

# Fondamenti di TELECOMUNICAZIONI

Prof. Marco Mezzavilla  
[marco.mezzavilla@polimi.it](mailto:marco.mezzavilla@polimi.it)