



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

UNIVERSITÀ "SAPIENZA" DI ROMA
FACOLTÀ DI INFORMATICA

Reti di Elaboratori

Appunti integrati con il libro "Computer Networking: A
Top-Down Approach", J. F. Kurose, K. W. Ross

Author
Simone Bianco

18 marzo 2023

Indice

0	Introduzione	1
1	Introduzione alle reti	2
1.1	Rete, Host e Collegamenti	2
1.2	Struttura di Internet	4
1.3	Pacchetti, Commutazione e Instradamento	7
1.4	Misura delle prestazioni	9

Capitolo 0

Introduzione

Capitolo 1

Introduzione alle reti

1.1 Rete, Host e Collegamenti

Definition 1. Rete e Link

Una **rete** è un'infrastruttura composta da dispositivi detti **nodi della rete** in grado di scambiarsi informazioni tramite dei mezzi di comunicazione, wireless o cablati, detti **link (o collegamenti)**

Definition 2. Nodi di una rete

I **nodi** costituenti una rete vengono differenziati in **due macrocategorie**:

- **Sistemi terminali**, differenziati a loro volta in
 - **Host**, ossia un dispositivo di proprietà dell'utente dedicato ad eseguire applicazioni utente
 - **Server**, ossia un dispositivo di elevate prestazioni destinato ad eseguire programmi che forniscono un servizio a diverse applicazioni utente
- **Dispositivi di interconnessione**, ossia dei dispositivi atti a modificare o prolungare il segnale ricevuto, differenziati a loro volta in:
 - **Router**, ossia dispositivi che collegano una rete ad una o più reti
 - **Switch**, ossia dispositivi che collegano più sistemi terminali all'interno di una rete
 - **Modem**, ossia dispositivi in grado di trasformare la codifica dei dati in segnale e viceversa

In particolare, classifichiamo le varie tipologie di rete in:

- **Personal Area Network (PAN)**, avente scala ridotta, solitamente equivalente a pochi metri (es: una rete Bluetooth)

- **Local Area Network (LAN)**, solitamente corrispondente ad una rete privata che collega i sistemi terminali di un appartamento (es: una rete wi-fi o Ethernet). Ogni sistema terminale possiede un indirizzo che lo identifica univocamente all'interno della LAN.

Si differenziano in **LAN con cavo condiviso**, ossia dove tutti i dispositivi sono connessi al router tramite un cavo comune, e **LAN con switch**, ossia dove tutti i dispositivi sono connessi ad uno o più switch, i quali a loro volta sono connessi al router

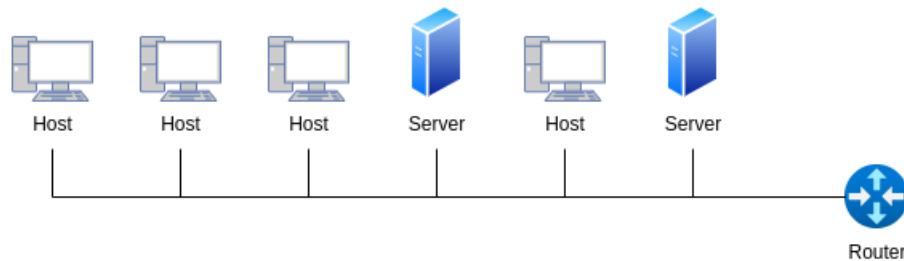
- **Metropolitan Area Network (MAN)**, avente scala pari ad una città
- **Wide Area Network (WAN)**, avente scala pari ad un paese o una nazione, solitamente gestita da un **Internet Service Provider (ISP)**.

Si differenziano in **WAN punto-punto**, ossia collegante due reti tramite un singolo mezzo mezzo di trasmissione, e **WAN a commutazione**, ossia collegante più reti tramite più mezzi e dispositivi di collegamento

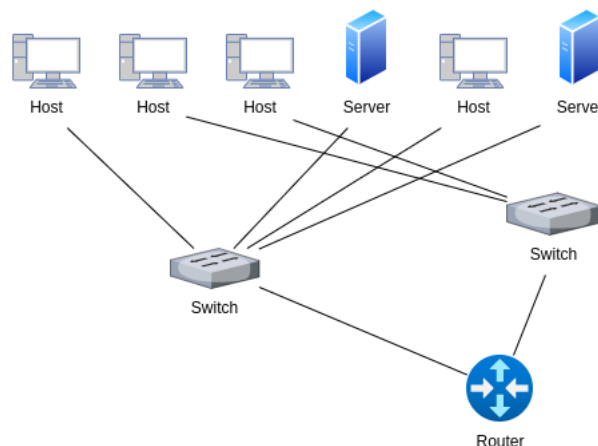
- L'**Internet**, avente scala globale

Esempi:

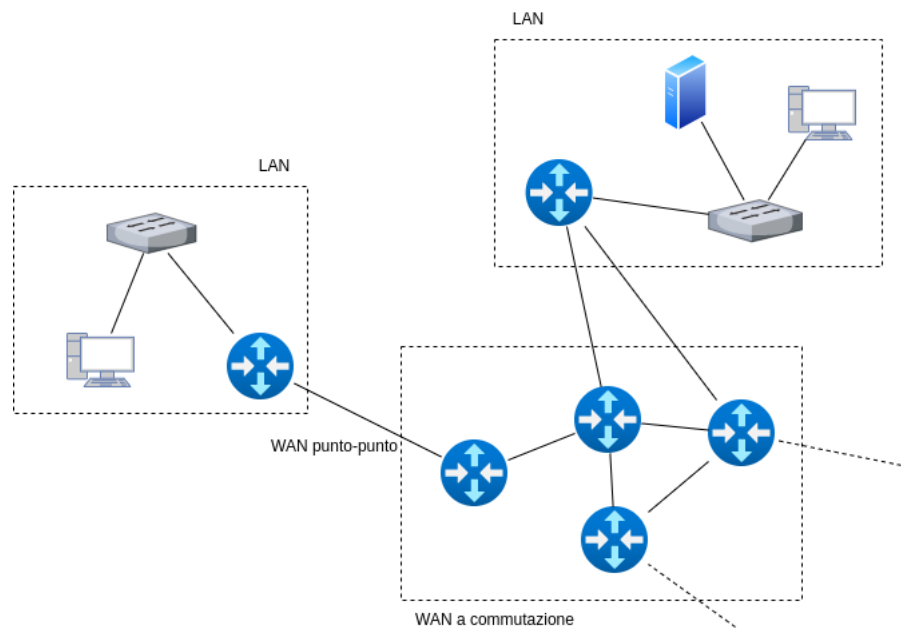
- **LAN a cavo condiviso**



- **LAN con switch**



- **Rete composta**



I supporti fisici utilizzabili per una trasmissione si differenziano in:

- **Doppino intrecciato** (ad esempio un cavo Ethernet), composto da due fili di rame isolati, uno utilizzato per inviare i dati ed uno per riceverli
- **Cavo coassiale**, composto da due conduttori di rame concentrici, entrambi bidirezionali, avente una larghezza di banda maggiore
- **Cavo in fibra ottica**, composto da una fibra di vetro che trasporta impulsi luminosi (dunque alla velocità della luce) al suo interno, ognuno rappresentante un singolo bit
- **Trasmissione wireless**, realizzata tramite l'invio di un segnale radio propagato nell'aria (es: rete cellulare, satellitare o wi-fi)

1.2 Struttura di Internet

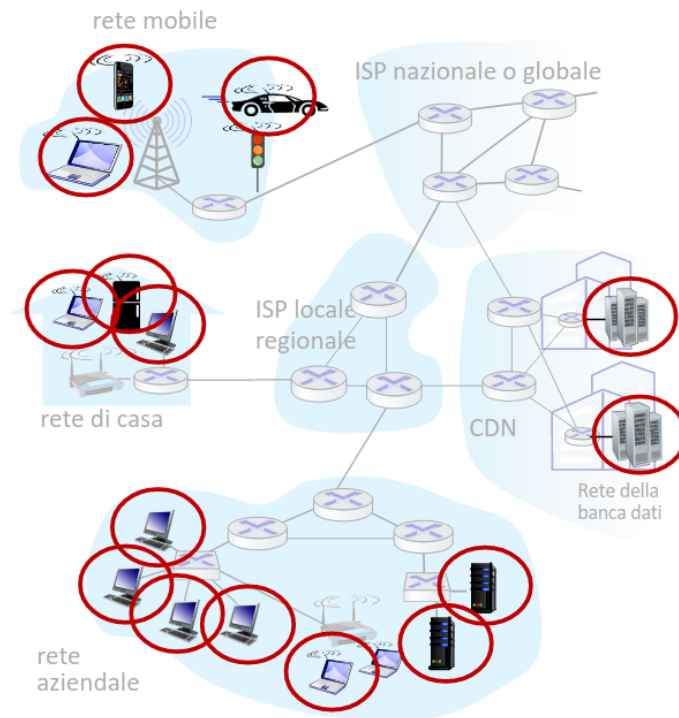
Definition 3. Rete internet

Definiamo come **internet** (abbreviativo di internetwork) una **rete di reti**, ossia una rete che mette in comunicazione due o più reti tra di loro.

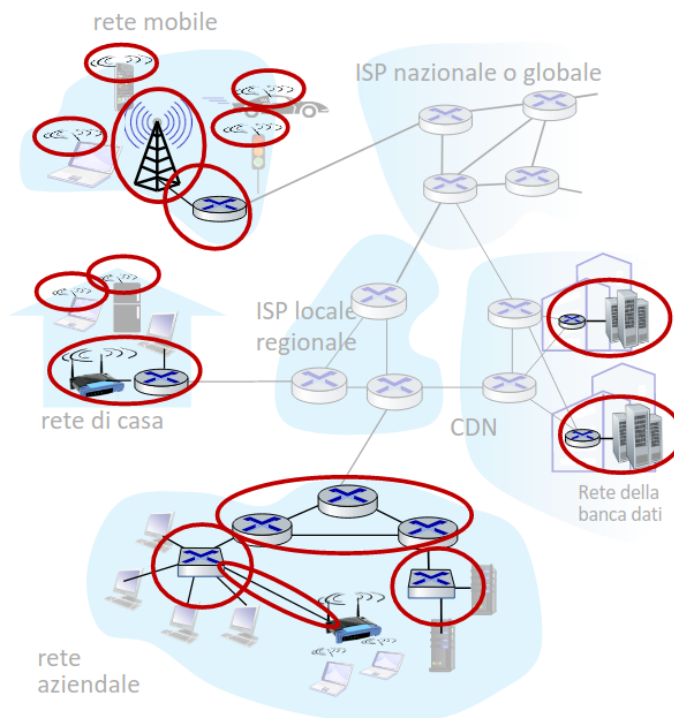
Attenzione: nonostante ciò che viene comunemente chiamato l'**Internet** sia una internet, è necessario puntualizzare che con tale termine comune viene indicata **la rete di tutte le reti**.

Al suo interno, la struttura di Internet risulta essere composta da:

- **Periferia della rete (network edge)**, corrispondente all'insieme di tutti i sistemi terminali connessi.

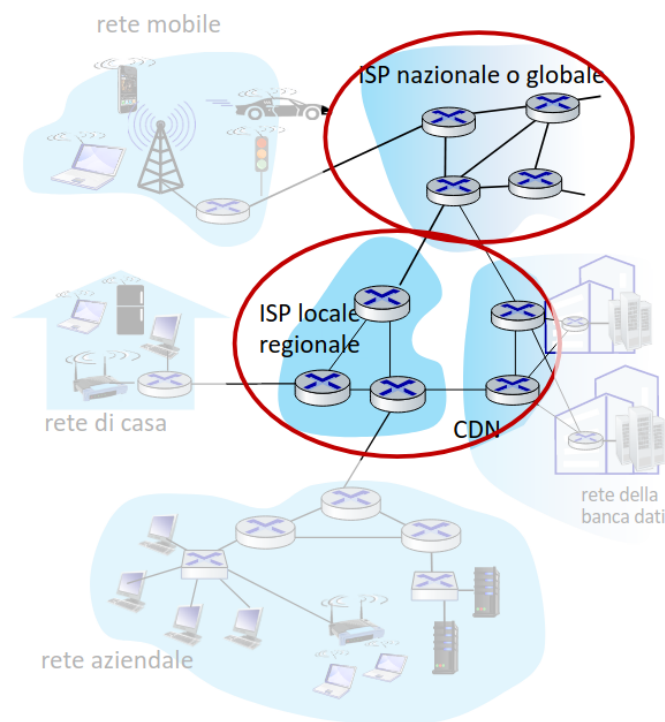


- **Reti di accesso (access network)**, corrispondente ai collegamenti fisici che connettono un sistema terminale al primo **edge router**, ossia il primo router presente nel percorso dal sistema terminale di origine ad un qualsiasi altro sistema terminale di destinazione.



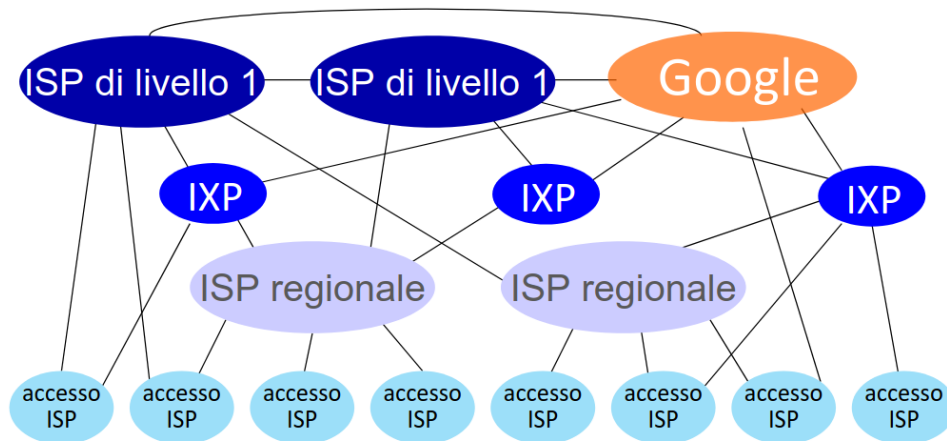
In particolare, l'accesso all'Internet può essere effettuato in più modi:

- **Accesso via cavo**, tramite supporti fisici connessi direttamente ad una rete di distribuzione, detta **cable headend** (es: il centralino di un ISP).
- **Accesso via Digital Subscriber Line (DSL)**, dove viene utilizzata la linea telefonica esistente per collegarsi alla rete dell'ISP
- **Accesso via Wireless LAN (WLAN)**, tramite un collegamento wireless ad una stazione base detta **access point** connessa con il router, a sua volta connesso con un cable headend
- **Accesso via rete cellulare**, dove viene utilizzata la rete cellulare esistente per collegarsi alla rete dell'ISP
- **Accesso via rete aziendale**, tramite una rete aziendale (o universitaria, privata, ...) direttamente connessa ad Internet
- **Nucleo di rete (core o backbone)**, ossia un sistema di router interconnessi tra di loro, corrispondente all'insieme di nodi tramite cui viene realizzata la vera interconnessione tra tutte le reti.



In particolare, all'interno del backbone di Internet sono presenti **più livelli di reti ISP** (es: regionali, nazionali, aziendali, ...), le quali devono essere interconnesse tra di loro tramite degli **Internet Exchange Point (IXP)**.

Inoltre, nel recente periodo, nel backbone di Internet sono state integrate anche delle grandi reti private aziendali, ossia le **reti dei content provider** (es: Google, Netflix, ...), le quali, ormai, funzionano come vere e proprie ISP.



1.3 Pacchetti, Commutazione e Instradamento

Definition 4. Pacchetto e Velocità di trasmissione

Dato un messaggio m da trasferire tra due terminali, definiamo come **pacchetti** l'insieme di blocchi di L bit tali che $m = \{p_1, \dots, p_k\}$.

Ogni pacchetto viene trasmesso nella rete ad una **velocità di trasmissione** R (anche detta larghezza di banda o capacità del collegamento).

Definition 5. Forwarding e Routing

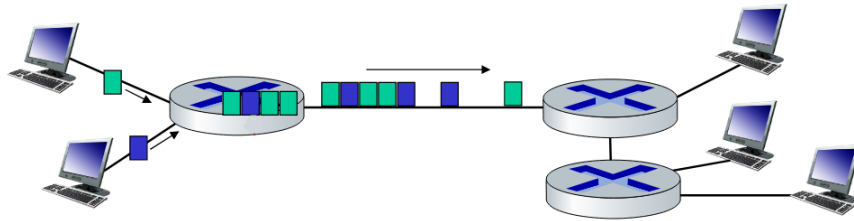
Le funzioni fondamentali di una rete si dividono in:

- **Forwarding o Switching (commutazione)**, ossia un'azione locale tramite cui vengono spostati i pacchetti in arrivo dal collegamento di ingresso del router al collegamento appropriato di uscita. Viene effettuato attraverso una **local forwarding table**, contenente gli indirizzi dei nodi locali
- **Routing (instradamento)**, ossia un'azione globale tramite cui vengono determinati i percorsi origine-destinazione seguiti dai pacchetti. Viene effettuato tramite **algoritmi di instradamento**

In particolare, la commutazione può avvenire in due modi:

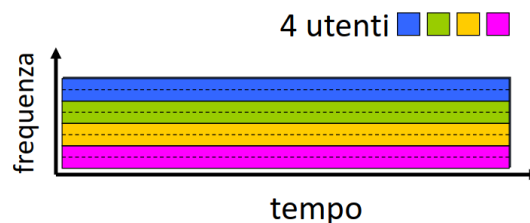
- **Commutazione di pacchetto:**
 - La rete inoltra i pacchetti da un router all'altro attraverso i collegamenti presenti nell'instradamento dall'origine alla destinazione.
 - Una volta inviato, un pacchetto deve completamente raggiungere il nodo a cui sta attualmente venendo inviato prima di poter essere trasmesso al collegamento successivo (**store & forward**)

- Se la velocità di trasmissione sul link di entrata supera la velocità di trasmissione di quello in uscita, i pacchetti verranno messi all'interno di una coda, in attesa di essere trasmessi sul link di uscita
- Se il buffer della coda raggiunge capienza massima, i pacchetti verranno scartati (**perdita di pacchetti**), per poi, se necessario, essere rinviati

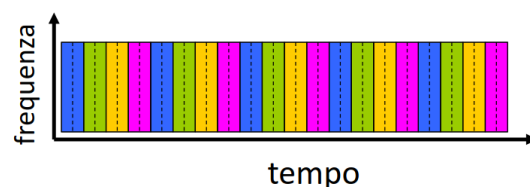


- **Commutazione di circuito:**

- La banda dei mezzi di trasmissione viene **suddivisa** in parti, riservando ognuna di essere ad una comunicazione tra un'origine ed una destinazione.
- Per via di tale suddivisione, il numero di utenti massimo della rete risulta essere **limitato dal numero di suddivisioni**
- La suddivisione può essere effettuata in due modalità:
 - * **Frequency Division Multiplexing (FDM)**, dove le frequenze del mezzo di trasmissione vengono suddivise in bande di frequenza, ognuna di esse riservata ad una singola comunicazione, la quale può utilizzare al massimo la banda ad essa riservata



- * **Time Division Multiplexing (TDM)**, dove il tempo viene suddiviso in slot, ognuno di essi riservato ad una singola comunicazione, la quale può utilizzare l'intera banda del mezzo per il breve lasso di tempo dedicato.



Nonostante la **commutazione di pacchetto** permetta l'accesso di un numero maggiore di utenti e non necessiti di stabilire una configurazione del collegamento, la presenza di una possibile perdita di pacchetti rende tale tipo di commutazione prettamente ottimo per **trasmissioni "bursty"**, ossia intermittenti e con lunghi periodi di inattività.

1.4 Misura delle prestazioni

Definition 6. Larghezza di banda e Transmission rate

Con il termine **larghezza di banda (bandwidth)** indichiamo due concetti strettamente legati tra loro:

- La quantità (espressa in Hz) rappresentante la **larghezza dell'intervallo di frequenze** utilizzato dal sistema trasmissivo, ossia l'intervallo di frequenze utilizzato dal sistema trasmissivo. Maggiore è tale quantità, maggiore è la quantità di informazioni veicolabili tramite il mezzo di trasmissione.
- La quantità (espressa in b/s) detta anche **transmission rate (o bit rate)** rappresentante la **quantità di bit al secondo** che un link **garantisce di trasmettere**. Tale quantità è proporzionale alla larghezza di banda (in Hz)

Definition 7. Throughput

Con il termine **throughput** indichiamo la **quantità di bit al secondo** che **passano attraverso un nodo** della rete.

Observation 1

A differenza del **transmission rate**, il quale fornisce una misura della **potenziale velocità di un link**, il **throughput** fornisce una misura dell'**effettiva velocità di un link**.

In generale, dunque, si ha che

$$T < R$$

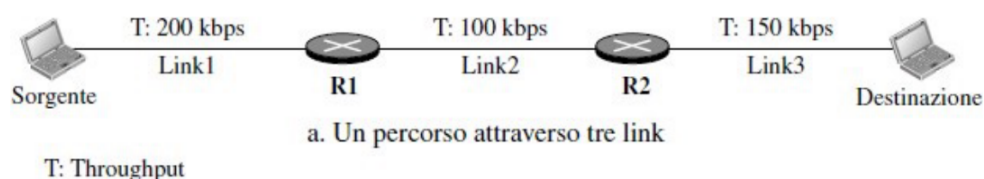
dove T è il throughput e R è il transmission rate

Definition 8. Collo di bottiglia

Dato un percorso end-to-end, ossia tra un dispositivo e un altro, definiamo come **collo di bottiglia** il link limitante il throughput dei link presenti su tale percorso

Esempio:

- Consideriamo il seguente percorso



- Il link $L2$ risulta essere il collo di bottiglia di tale percorso, limitando il throughput del percorso a 100 kb/s

Definition 9. Delay di trasmissione

Definiamo come **delay (o latenza) di trasmissione** il tempo necessario ad un nodo per immettere un pacchetto su un link, corrispondente a:

$$D_t = \frac{L}{R}$$

dove L è la dimensione del pacchetto e R è il transmission rate del link

Definition 10. Delay di propagazione

Definiamo come **delay (o latenza) di propagazione** il tempo impiegato dall'**ultimo bit di blocco di dati** posto su un link ad essere propagato fino al nodo di destinazione, corrispondente a:

$$D_p = \frac{k}{v}$$

dove k è la lunghezza del link e v è la velocità di propagazione del link

Definition 11. Delay di un pacchetto

Definiamo come **delay (o latenza) di un pacchetto** il tempo totale necessario ad un pacchetto per essere inviato completamente da un nodo origine ad un nodo destinatario

$$D_n = D_e + D_q + D_t + D_p$$

dove:

- D_e è il **delay di elaborazione del nodo**, dipendente dalle operazioni di controllo svolte dal nodo
- D_q è il **delay di queueing**, ossia l'attesa del pacchetto all'interno della coda del nodo prima di essere trasmesso, dipendente dalla quantità di pacchetti presenti nella coda
- D_t è il delay di trasmissione del link
- D_p è il delay di propagazione del link

Proposition 1. Prodotto rate per delay di propagazione

Dato un link con transmission rate R e delay di propagazione D_p , il prodotto

$$B_{max} = R \cdot D_p = \frac{L \cdot k}{D_t \cdot v}$$

rappresenta il **massimo numero di bit distribuiti tutto sul cavo** contemporaneamente

Esempi:

1. Si consideri un router A che trasmette pacchetti, ognuno di lunghezza $L = 4000$ bit, su un canale di trasmissione con rate $R = 10$ Mb/s verso un router B all'altro estremo del link. Si supponga che il delay di propagazione sia pari a 0.2 ms.

- Quanto impiega il router A a trasmettere un pacchetto al router B?

$$D_t = \frac{L}{R} = \frac{4 \cdot 10^3 \text{ b}}{10^7 \text{ b/s}} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ s} = 0.4 \text{ ms}$$

- Quanto impiega il router A a trasmettere un bit al router B?

$$D_{1b} = \frac{1}{R} = \frac{1 \text{ b}}{10^7 \text{ b/s}} = 10^{-7} \text{ s} = 0.1 \text{ } \mu\text{s}$$

- Qual è il massimo numero di pacchetti al secondo che possono essere trasmessi sul link?

$$\begin{aligned} 1 \text{ P} = 4000 \text{ b} &\implies 1 \text{ b} = \frac{1}{4000} \text{ P} \implies \\ \implies R = 10^7 \text{ b/s} &= \frac{10^7}{4000} \text{ P/s} = \frac{1}{4} \cdot 10^3 \text{ P/s} = 2500 \text{ P/s} \end{aligned}$$

- Supponendo che il router A invii i pacchetti uno dopo l'altro senza introdurre ritardi tra la trasmissione di un pacchetto e il successivo, quanto tempo impiega il router B a ricevere 4 pacchetti?

Poiché i pacchetti vengono inviati senza alcun delay tra di essi, possiamo considerare tali pacchetti come un unico grande pacchetto di dimensione $4 \cdot L$, implicando che

$$D_{4t} = \frac{4 \cdot L}{R} = \frac{16 \cdot 10^3 \text{ b}}{10^7 \text{ b/s}} = 16 \cdot 10^{-4} \text{ s} = 1.6 \text{ ms}$$

Inoltre, per lo stesso motivo, il tempo di propagazione rimarrà inalterato, poiché esso non dipende dalla lunghezza del pacchetto, ma solo dalla lunghezza e della velocità di propagazione del link. Di conseguenza, il tempo totale impiegato sarà $1.6 \text{ ms} + 0.2 \text{ ms} = 1.8 \text{ ms}$

- Qual è il massimo numero di bit e il numero di pacchetti che possono essere presenti sul canale?

$$P_{max} = R \cdot D_p = 10^7 \text{ b/s} \cdot 0.2 \text{ ms} = 2000 \text{ b} = \frac{1}{2} \text{ P}$$

2. Si consideri un host A che vuole inviare un file molto grande, 4 milioni di byte, a un host B. Il percorso tra A e B ha 3 link L_1, L_2, L_3 , ognuno di lunghezza 300 km, ciascuno con rate rispettivo $R_1 = 500$ kb/s, $R_2 = 2$ Mb/s e $R_3 = 1$ Mb/s.

- Assumendo l'assenza di ulteriore traffico nella rete, qual è il throughput per il file transfer?

Poiché il link L_1 risulta essere il collo di bottiglia del percorso, il throughput risulta essere $R_1 = 500$ kb/s

- Qual è il tempo totale impiegato per trasferire il file al'host B assunto che i link siano cavi in fibra ottica?

Poiché non vi è specificata la lunghezza di ogni pacchetto, assumiamo che il file venga inviato come un unico grande pacchetto, implicando che $L = 4 \cdot 10^6 B = 32 \cdot 10^6 b$.

Di conseguenza, si ha che:

$$D_t(L_1) = \frac{32 \cdot 10^6 b}{5 \cdot 10^5 b/s} = 64 s$$

$$D_t(L_2) = \frac{32 \cdot 10^6 b}{2 \cdot 10^6 b/s} = 16 s$$

$$D_t(L_3) = \frac{32 \cdot 10^6 b}{1 \cdot 10^6 b/s} = 32 s$$

Poiché L_1, L_2, L_3 sono cavi in fibra ottica, la velocità di propagazione su di essi corrisponde alla velocità della luce, pari a $\sim 3 \cdot 10^8 m/s$. Dunque, il delay di propagazione di ogni link corrisponderà a:

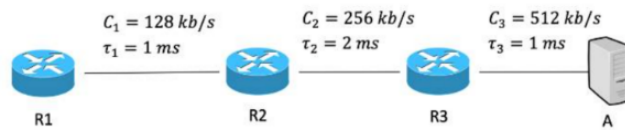
$$D_p = \frac{3 \cdot 10^5 m}{3 \cdot 10^8 m/s} = 1 ms$$

Infine, concludiamo che il tempo totale impiegato corrisponda a:

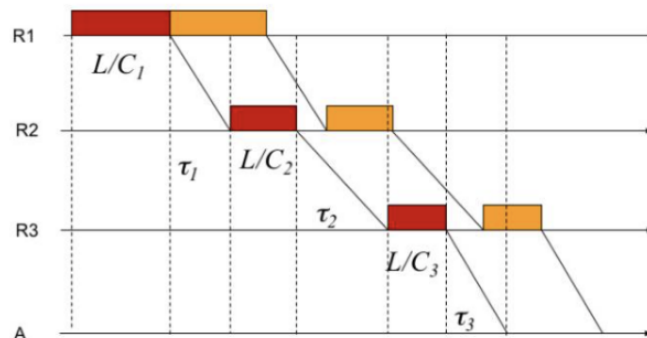
$$D_{tot} = D_t(L_1) + D_t(L_2) + D_t(L_3) + 3 \cdot D_p = 64 s + 16 s + 32 s + 3 \cdot 1 ms = 112,003 s$$

3. Si consideri la rete nella seguente figura, dove C_1, C_2, C_3 e τ_1, τ_2, τ_3 sono rispettivamente i transmission rate e i delay di propagazione dei tre link.

Al tempo $t = 0$, la coda di uscita di R_1 contiene 2 pacchetti diretti ad A . Assumendo che la lunghezza dei pacchetti sia $L = 512 b$, si indichi per ciascun pacchetto l'istante in cui esso viene completamente ricevuto da A .



Per aiutarci durante il calcolo, grafichiamo il contenuto di ogni coda al passare del tempo:



Dunque, il tempo totale impiegato dal primo pacchetto corrisponderà a:

$$T_1 = \frac{L}{C_1} + \tau_1 + \frac{L}{C_2} + \tau_2 + \frac{L}{C_3} + \tau_3 = 4 \text{ ms} + 1 \text{ ms} + 2 \text{ ms} + 2 \text{ ms} + 1 \text{ ms} + 1 \text{ ms} = 11 \text{ ms}$$

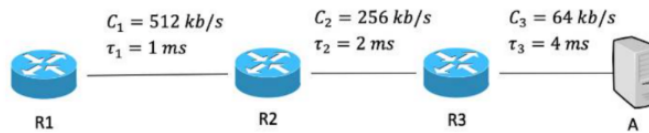
Analogamente, il tempo totale impiegato dal secondo pacchetto corrisponderà a:

$$T_2 = 2 \cdot \frac{L}{C_1} + \tau_1 + \frac{L}{C_2} + \tau_2 + \frac{L}{C_3} + \tau_3 = 8 \text{ ms} + 1 \text{ ms} + 2 \text{ ms} + 2 \text{ ms} + 1 \text{ ms} + 1 \text{ ms} = 15 \text{ ms}$$

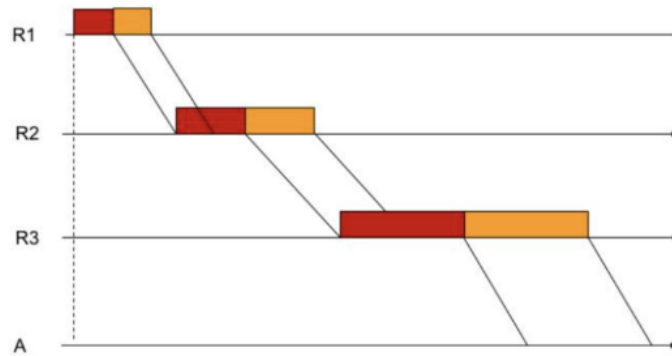
4. Si consideri la rete nella seguente figura, dove C_1, C_2, C_3 e τ_1, τ_2, τ_3 sono rispettivamente i transmission rate e i delay di propagazione dei tre link.

Al tempo $t = 0$, la coda di uscita di R_1 contiene 2 pacchetti diretti ad A . Assumendo che la lunghezza dei pacchetti sia $L = 512$ b, si indichi per ciascun pacchetto l'istante in cui esso viene completamente ricevuto da A .

Inoltre, supponendo che vi siano n pacchetti, si indichi una formula generica descrivente per ciascun pacchetto l'istante in cui esso viene completamente ricevuto da A .



Come nel caso precedente, grafichiamo il contenuto di ogni coda al passare del tempo:



Il tempo totale impiegato dal primo pacchetto corrisponderà a:

$$T_1 = \frac{L}{C_1} + \tau_1 + \frac{L}{C_2} + \tau_2 + \frac{L}{C_3} + \tau_3 = 1 \text{ ms} + 1 \text{ ms} + 2 \text{ ms} + 2 \text{ ms} + 8 \text{ ms} + 4 \text{ ms} = 18 \text{ ms}$$

Notiamo come, a differenza del caso precedente, il secondo pacchetto giunge nelle code successive mentre il primo pacchetto deve essere ancora completamente spedito, implicando che esso debba essere inserito nella coda di attesa.

Dunque, una volta raggiunta la coda finale, il secondo pacchetto potrà essere inviato solo una volta completato il primo pacchetto.

Di conseguenza, il suo tempo totale di ricezione corrisponde a:

$$T_2 = T_1 + \frac{L}{C_3} = 18 \text{ ms} + 8 \text{ ms} = 26 \text{ ms}$$

Applicando lo stesso ragionamento nel caso di n pacchetti, la formula generica descrivente l'istante di ricezione dell' n -esimo pacchetto corrisponde a:

$$T_n = T_{n-1} + \frac{L}{C_3} = T_{n-2} + 2 \cdot \frac{L}{C_3} = \dots = T_1 + (n-1) \frac{L}{C_3} = 18 \text{ ms} + 8(n-1) \text{ ms}$$