

## Esercizio di preparazione all'Esame di Stato 2017

### Materia: Telecomunicazioni

Un committente richiede un preliminare di progetto per una rete locale sita in un proprio *campus*, fornendo le seguenti specifiche:

- La rete deve impiegare
  - la suite di protocolli TCP/IP;
  - almeno la tecnologia Gigabit Ethernet, con cablaggio conforme agli standard;
  - la tecnologia Wi-Fi per assicurare l'accesso anche a dispositivi mobili (pc portatili, tablet, smartphone);
- la rete deve avere una topologia a maglia completa, realizzata con tre switch che operano in modalità *store and forward*;
- la lunghezza massima dei collegamenti fra un dispositivo finale (computer, ecc.) e uno switch è di 100 m, mentre la lunghezza massima dei collegamenti fra due switch è di 200 m. La velocità di propagazione sui mezzi trasmissivi è pari a  $2,1E+8$  m/s;
- in rete vi sono diversi computer, degli apparati Wi-Fi e alcuni server, tra cui un server con funzioni di backup di file di configurazione degli apparati e dei servizi implementati sui server stessi.

Inoltre il committente desidera avere una stima delle prestazioni della rete nel caso in cui da un PC posto alla massima distanza da un primo switch si desideri scaricare un file di 20 MB da un server della rete, sapendo che il server è collegato a un secondo switch da un cavo lungo 10 m, mentre i due switch sono collegati tra loro da un cavo lungo 200 m, sotto le seguenti ipotesi:

- per trasferire il file si impiega un protocollo di applicazione che opera con correzione d'errore per ritrasmissione e controllo di flusso di tipo *stop and wait*;
- il protocollo di applicazione opera formando delle 7-PDU (Protocol Data Unit dello strato 7 OSI) caratterizzate da un header di 2 B. La conferma di corretta ricezione (ACK) viene trasferita in una 7-PDU avente lunghezza totale pari a 4 B;
- il protocollo di applicazione utilizza il servizio di trasporto offerto da un protocollo dello strato 4 che opera in modalità *connectionless* ed è caratterizzato da 4-PDU aventi un header di 8 B;
- il protocollo dello strato 3 opera anch'esso in modalità *connectionless* e crea delle 3-PDU aventi un header di 20 B;
- il protocollo dello strato 2 impiegato è Ethernet II, che in questo caso opera con frame aventi un campo informativo (*o payload*) di dimensione pari a 542 B quando si trasportano le 7-PDU contenenti dati.

Fatta ogni ipotesi aggiuntiva che si ritiene utile, si chiede di

1. Descrivere l'infrastruttura di rete che si propone operando nel seguente modo:
  - a. Rappresentare graficamente la topologia fisica della rete e illustrarne i vantaggi, la principale problematica che la topologia adottata presenta e come si possa ovviare a tale problematica; effettuare quindi una classificazione degli switch e illustrarne il principio di funzionamento.
  - b. Scegliere i mezzi trasmissivi da utilizzare nei collegamenti tra PC, server e switch, nonché tra switch e switch giustificando le scelte fatte in relazione agli standard in vigore sia in termini di tipo di cablaggio che di prestazioni certificabili;
  - c. Scegliere gli apparati che offrono la copertura Wi-Fi giustificando le scelte fatte in relazione agli standard in vigore; illustrare sinteticamente le procedure che si intendono mettere in campo per garantire la sicurezza degli accessi Wi-Fi.

2. Valutare le prestazioni della rete nel caso proposto dal committente operando nel seguente modo.
  - I. Rappresentare graficamente la pila di protocolli utilizzata e il processo di incapsulamento, illustrando sinteticamente la funzione di ciascun protocollo in relazione al Modello di Riferimento ISO/OSI.
  - II. Calcolare:
    - a) la dimensione totale di un frame Ethernet II (2-PDU) che trasporta dati;
    - b) la dimensione massima di una 3-PDU che può essere trasportata da una 2-PDU (frame Ethernet II);
    - c) la dimensione massima di una 4-PDU che può essere trasportata da una 3-PDU;
    - d) la dimensione massima di una 7-PDU che può essere trasportata da una 4-PDU;
    - e) la dimensione massima che può avere ciascun blocco di byte in cui va suddiviso il file da trasferire, blocco che costituisce il campo informativo, o *payload*, delle 7-PDU generate dal protocollo di applicazione;
    - f) la dimensione totale di un frame Ethernet II (2-PDU) che trasporta le conferme di corretta ricezione (ACK) generate dal protocollo di applicazione.
  - III. Calcolare:
    - a) il tempo di trasmissione di un frame;
    - b) il ritardo causato da ciascun collegamento e il ritardo causato da ciascuno switch (si trascuri il tempo di trasferimento tra porta di ingresso e porta di uscita dello switch);
    - c) il tempo di andata-ritorno o RTT (*Round Trip Time*).
  - IV. Calcolare la velocità di informazione a livello di applicazione, o *throughput*, con cui viene trasmesso il file e il tempo necessario al suo trasferimento in assenza di errori.
  - V. Con adeguate motivazioni, indicare delle scelte alternative per il protocollo di applicazione e per quello di trasporto che consentano aumentare il *throughput* e quindi di diminuire il tempo di trasferimento del file, mantenendo inalterati il protocollo dello strato 3 e la tecnologia Ethernet impiegata.
3. Proporre delle indicazioni generali per ottenere prestazioni elevate nel caso in cui la rete locale vada utilizzata per tutte le forme di comunicazione: scambio di dati, audio e video su IP (streaming, IPTV, video on demand, videoconferenze, ecc.), telefonia su IP (in tecnologia VoIP, Voice over IP), per cui sono presenti in rete anche dei sistemi di videocomunicazione su IP e numerosi telefoni IP in tecnologia VoIP.

## Svolgimento

### 1. Descrivere l'infrastruttura di rete

- I. La topologia a maglia completa è caratterizzata dal fatto che ogni switch è collegato a tutti gli altri switch; in questo caso quindi ciascuno switch è collegato ad altri due switch (Figura 1); per i dettagli si rimanda al libro di testo (cap. 2 par. 2.1).

Il vantaggio di questa topologia è l'alta disponibilità e la robustezza della rete in quanto i collegamenti tra gli switch sono ridondati, per cui se un collegamento subisce un guasto (si interrompe un cavo o si guasta la porta dello switch a cui è attestato il cavo) la rete non ne risente e continua a funzionare normalmente in quanto vi è un collegamento alternativo.

Il problema che presenta questa topologia è la presenza di *loop* (anelli), Figura 2, lungo i quali gli switch possono ritrasmettere continuamente i frame di *broadcast* (frame destinati a tutti i dispositivi connessi in rete), emessi per esempio quando opera il protocollo ARP; uno switch che riceve un frame di broadcast lo ritrasmette su tutte le sue porte, per cui gli switch continuano a re inviarsi i frame di broadcast saturando rapidamente la banda offerta dalla rete e degradandone sempre più le prestazioni.

Per questo motivo la problematica è nota come *broadcast storm* (letteralmente “tempesta di broadcast”).

Per ovviare al problema dei loop, e quindi dei broadcast storm, si deve attivare negli switch il protocollo STP (*Spanning Tree Protocol*), con il quale gli switch colloquiano e impediscono la formazione dei loop pur mantenendo la topologia a maglia, Figura 2.

Infatti il protocollo STP disabilita una porta di uno switch per aprire il loop, mantenendo così attivi solo alcuni collegamenti e tenendo gli altri di riserva; nel caso in cui un collegamento subisca un guasto allora il protocollo STP attiva il collegamento di riserva, abilitando la porta dello switch a cui esso è attestato.

Per la classificazione e il principio di funzionamento degli switch si rimanda la libro di testo (cap. 3 par. 5.2).

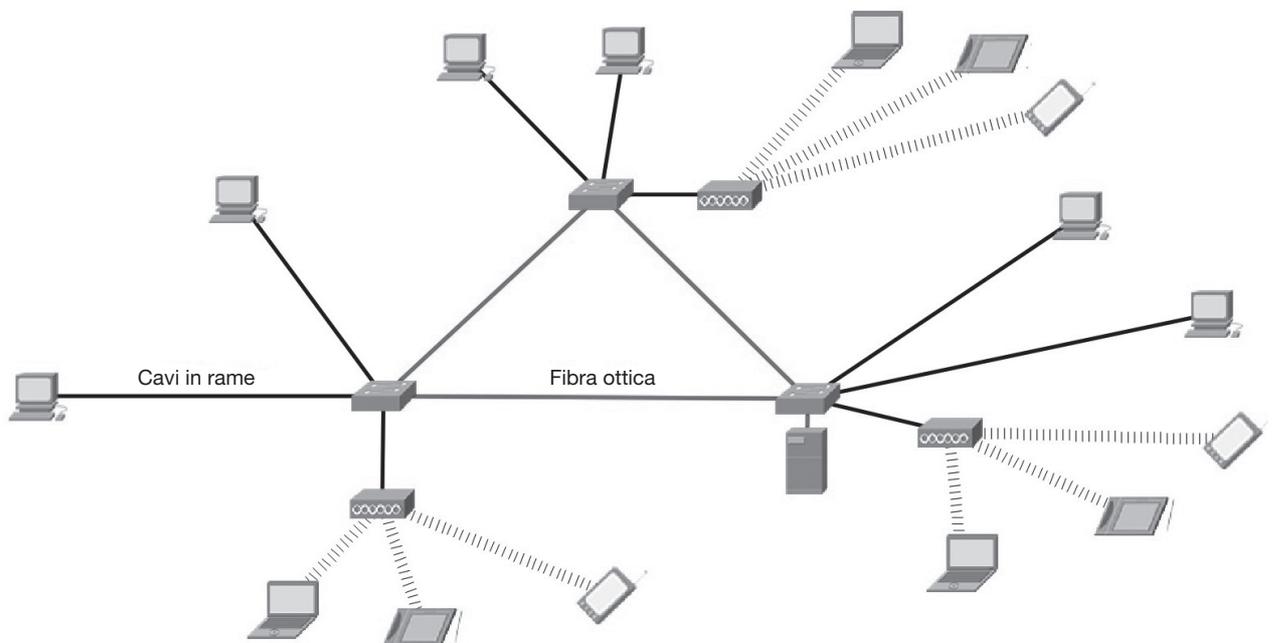


Figura 1 Topologia fisica a maglia completa

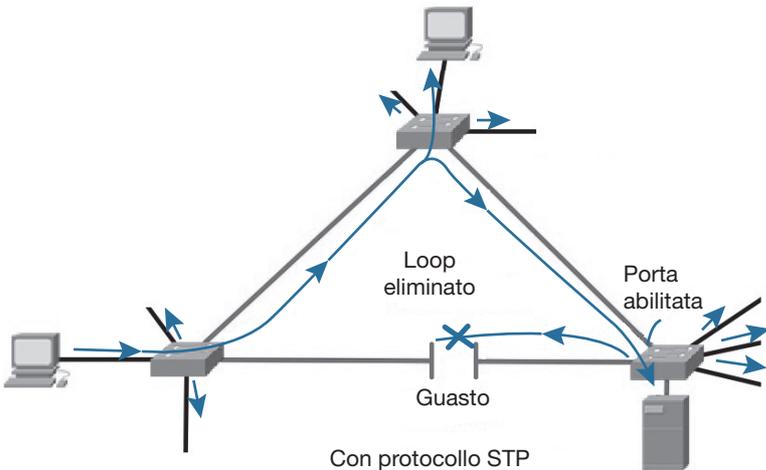
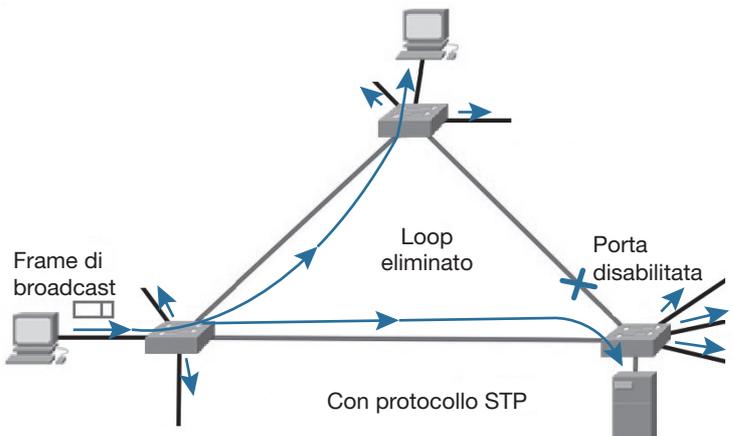
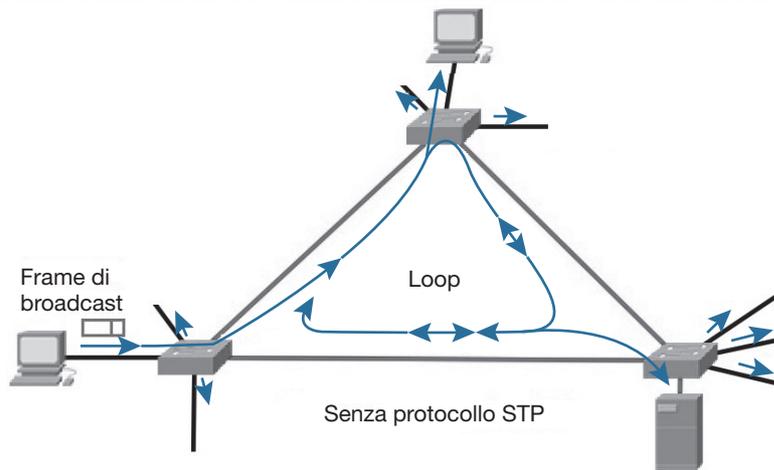


Figura 2 Loop e loro eliminazione con protocollo STP.

- II. La scelta dei mezzi trasmissivi viene fatta seguendo le indicazioni degli standard relativi al cablaggio strutturato (ANSI/TIA 568 e ISO/IEC 11801), per la cui descrizione si rimanda al libro di testo (cap. 2 par. 4).

Per i collegamenti tra PC e switch (cablaggio orizzontale) si possono utilizzare cavi in rame, in quanto la lunghezza massima dei collegamenti rientra in quella prevista dagli standard che è appunto di 100 m.

Per il *permanent link*, a seconda degli ambienti in cui si opera è possibile utilizzare cavi U/UTP, non schermati, oppure cavi F/UTP (schermati contro disturbi esterni) o F/FTP (schermati contro i disturbi esterni e contro la diafonia); i cavi di interconnessione tra PC e presa di rete (o *Telecom Outlet*), detti *patch*, possono essere di tipo U/UTP.

Il cablaggio deve essere certificato almeno in categoria 6, per garantire il pieno supporto alla tecnologia Gigabit Ethernet (1000BASE-T).

Una nota particolare meritano le connessioni fra switch e access point Wi-Fi: poiché access point conformi agli standard Wi-Fi più recenti (IEEE 802.11ac wave 2) possono operare con velocità di trasmissione superiori a 1 Gbit/s, (praticamente circa 2 Gbit/s e, teoricamente, oltre i 3 Gbit/s) può essere conveniente collegarli allo switch con un cablaggio certificato in categoria 6A, in grado di supportare la tecnologia 10Gigabit Ethernet (10GBASE-T).

In questo modo la connessione Ethernet fra switch e access point non costituisce un collo di bottiglia per l'access point stesso, che così può offrire ai propri client le massime prestazioni.

Per i collegamenti fra gli switch (cablaggio verticale e/o dorsale di campus) si deve optare per connessioni in fibra ottica (f.o.).

E' possibile impiegare f.o. multimodali (MMF) conformi allo standard OM4 (vol. 2, cap.5, par. 8), in modo da supportare anche la tecnologia 10Gigabit Ethernet; si deve tenere presente, infatti, che il cablaggio dovrebbe durare molti anni (almeno 10 anni), per cui è preferibile che sia certificato per uno standard in grado di supportare una tecnologia Ethernet superiore a quella che viene utilizzata al momento della sua realizzazione (nel nostro caso la Gigabit Ethernet).

- III. Gli apparati Wi-Fi da utilizzare per offrire l'accesso wireless ai client sono access point (a.p.) Wi-Fi; gli standard tra cui scegliere sono l'IEEE 802.11n, meno recente, e l'IEEE 802.11ac, più recente, per la cui descrizione si rimanda al libro di testo (cap. 4 par. 5). Per offrire le migliori prestazioni ai client e in considerazione del fatto che gli access point conformi allo standard IEEE 802.11ac possono anche servire client che operano con schede Wi-Fi meno recenti, a standard IEEE 802.11n o IEEE 802.11g, risulta conveniente optare per access point IEEE 802.11ac<sup>1</sup>. Il numero di access point da installare varia a seconda del numero di client da servire e dell'area a cui è necessario dare la copertura radio; nella scelta del numero di a.p. va tenuto conto che la banda degli access point, fino a quelli conformi allo standard IEEE 802.11ac wave 1, è condivisa tra tutti i client e che la velocità di trasmissione netta è inferiore rispetto a quella massima teorica, per cui nel caso vi siano molti client è opportuno installare diversi access point, facendoli operare con potenze ridotte, in modo tale da non avere un numero eccessivo di client connessi a uno stesso a.p.; inoltre è opportuno effettuare un *site survey* (cap. 4 par. 6) in modo da identificare i punti migliori di collocazione degli a.p. così da offrire la miglior copertura radio impiegando la potenza minima necessaria allo scopo (si veda il libro di testo per i dettagli).

Infine, nel caso sia necessario installare numerosi access point può essere conveniente avere una gestione centralizzata degli stessi, tramite un *WLAN controller* o acquistando

---

<sup>1</sup> La prima versione dello standard IEEE 802.11ac viene detta wave 1, mentre la seconda versione, con prestazioni maggiori, viene detta wave 2.

access point con gestione cloud, i quali possono essere configurati e gestiti accedendo via Internet a un server di gestione raggiungibile tramite un apposito sito Internet. In questo modo la loro gestione può essere effettuata da un qualsiasi computer connesso a Internet.

Gli accessi Wi-Fi vanno poi adeguatamente protetti sia contro tentativi di accesso non autorizzati sia contro intercettazioni delle informazioni inviate via radio; a tale scopo è possibile seguire i criteri indicati sul libro di testo (cap. 4 par. 7): impiego di autenticazione e crittografia a standard WPA2/AES; limitazione della copertura radio all'area da servire regolando la potenza di trasmissione; eventuale filtraggio degli indirizzi MAC, ecc. Esistono poi sistemi Wi-Fi che, oltre a implementare criteri di sicurezza a livello Wi-Fi, consentono un controllo completo degli utenti, dei dispositivi e delle applicazioni che accedono in rete tramite essi, in quanto integrano meccanismi di autenticazione forte degli utenti (username e password), firewall e content filter (blocco degli accessi a determinati siti), filtraggio delle applicazioni che possono operare in rete, ecc.

## 2. Valutazione delle prestazioni della rete.

- I. La pila di protocolli (o *protocol stack*) e il processo di incapsulamento si possono rappresentare come in Figura 3, in cui sono indicati anche i protocolli che nella pratica possono essere utilizzati nel caso proposto<sup>2</sup>. Per la descrizione degli strati OSI, del processo di incapsulamento e dei protocolli facenti parte della suite TCP/IP si rimanda al libro di testo (cap. 1 par. 2 e 5).

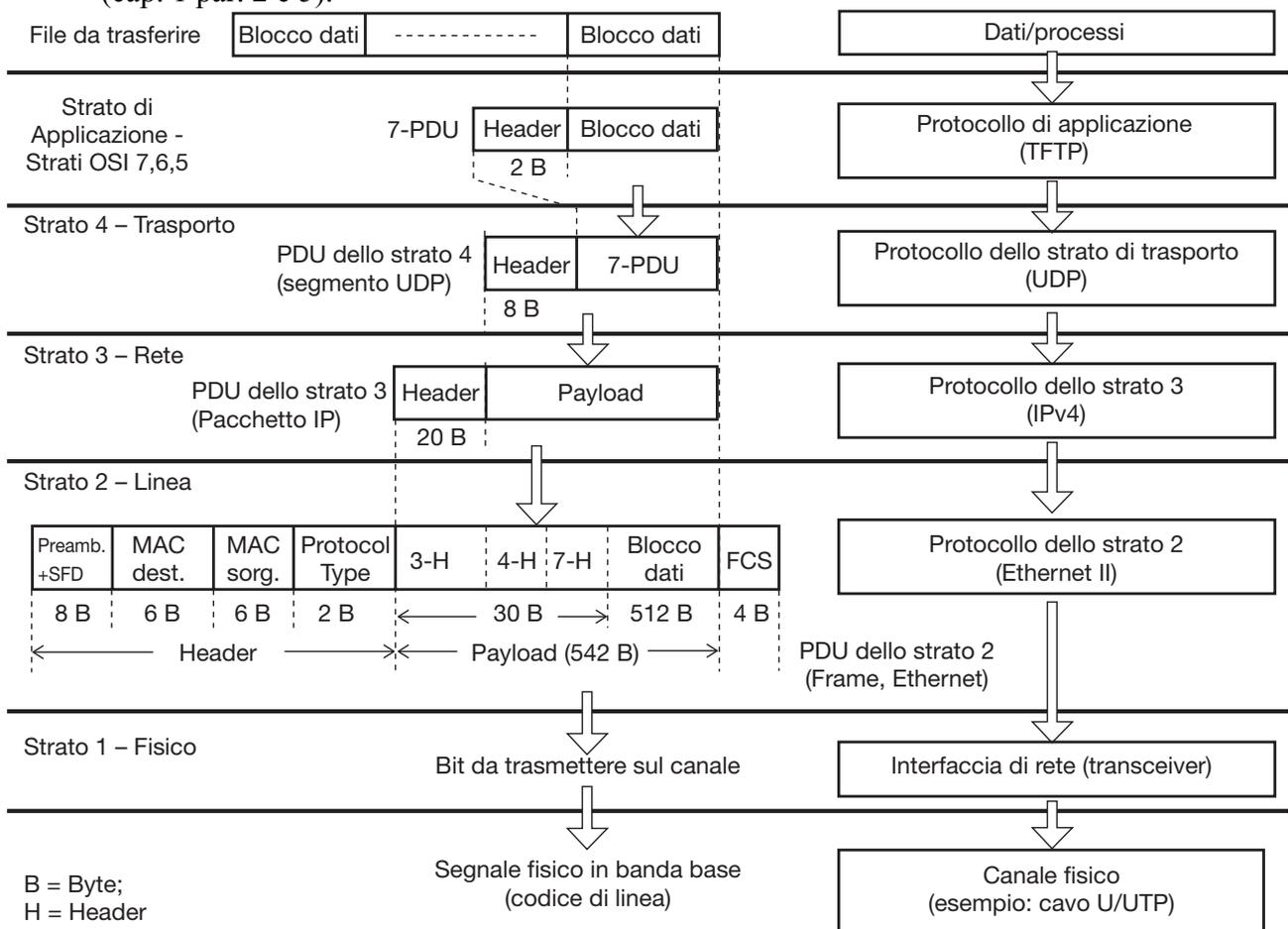


Figura 3 Processo di incapsulamento e pila di protocolli

<sup>2</sup> I protocolli degli strati OSI 7, 6, 5 fanno parte dello strato di Applicazione della suite TCP/IP; nel caso in esame gli strati OSI 6 e 5 si possono trascurare in quanto le loro funzioni non sono qui necessarie.

Facendo riferimento alla Figura 3 si può procedere con i calcoli richiesti.

- II. a) Calcolo della dimensione totale di un frame Ethernet II (2-PDU) che trasporta dati; la composizione di un frame Ethernet II è riportata in figura 3 (si rimanda al libro di testo per la descrizione e la funzione dei diversi campi, cap. 2 par. 3.1 e cap. 3 par. 2); poiché il campo informativo del frame (detto *payload*) è pari a 542 B, si ha che la dimensione di un frame che trasporta dati è pari a:

$$D_{frame} = H_{Ethernet} + D_{payload\_Eth} + FCS = (8 + 6 + 6 + 2) + 542 + 4 = 568 B$$

- b) La dimensione massima che può avere una 3-PDU (pacchetto IPv4) è pari al payload del frame, per cui è pari a

$$D_{3-PDU} = D_{payload\_Frame} = 542 B$$

- c) La dimensione massima che può avere una 4-PDU (segmento UDP) è pari al payload (campo informativo) di una 3-PDU, per cui si ottiene sottraendo alla dimensione della 3-PDU la dimensione del suo Header ( $H_{3-PDU}$ ):

$$D_{4-PDU} = D_{3-PDU} - H_{3-PDU} = 542 - 20 = 522 B$$

- d) La dimensione massima che può avere una 7-PDU è pari al payload (campo informativo) di una 4-PDU, per cui si ottiene sottraendo alla dimensione della 4-PDU la dimensione del suo Header ( $H_{4-PDU}$ ):

$$D_{7-PDU} = D_{4-PDU} - H_{4-PDU} = 522 - 8 = 514 B$$

- e) La dimensione massima che può avere un blocco di dati trasportato nel payload di una 7-PDU si ottiene sottraendo alla dimensione della 7-PDU la dimensione del suo Header ( $H_{7-PDU}$ ):

$$D_{Blocco\_dati} = D_{7-PDU} - H_{7-PDU} = 514 - 2 = 512 B$$

- f) La dimensione di un frame (2-PDU) che trasporta una conferma di corretta ricezione si calcola tenendo presente che gli standard Ethernet prescrivono che il payload di un frame debba avere una dimensione minima pari a 46 B; quando le 3-PDU da trasportare hanno una dimensione inferiore a 46 B, come nel caso in esame in cui tale dimensione è pari a:

$$D_{3-PDU} = H_{3-PDU} + H_{4-PDU} + D_{7-PDU\_ACK} = 20 + 8 + 4 = 32 B$$

viene aggiunto un riempimento (detto *padding* e costituito da byte posti a 0) per arrivare alla dimensione minima del payload (46 B);  
ne consegue che la dimensione totale di un frame che trasporta una conferma di corretta ricezione è pari a:

$$D_{Frame\_ACK} = H_{Ethernet} + D_{payload\_Eth} + FCS = (8 + 6 + 6 + 2) + 46 + 4 = 72 B$$

III. a) Poiché la velocità di trasmissione lorda (o bit rate, BR) della tecnologia Ethernet impiegata è pari a 1000 Mbit/s, si ha che:

- la durata di un frame che trasporta dati (senza contare l'Inter Frame Gap, IFG, che separa due frame successivi) è pari a:

$$\Delta t_{Frame\_dati} = \frac{D_{Frame\_dati} \cdot 8}{BR} = \frac{568 \cdot 8}{1 \cdot 10^9} \cong 4,54 \mu s$$

- la durata di un frame che trasporta una conferma di corretta ricezione (ACK) è pari a

$$\Delta t_{Frame\_Ack} = \frac{D_{Frame\_Ack} \cdot 8}{BR} = \frac{72 \cdot 8}{1 \cdot 10^9} \cong 0,576 \mu s$$

b) Nota la lunghezza dei mezzi trasmissivi impiegati per collegare il PC allo switch ( $l_1=100$  m), due switch fra loro ( $l_2=200$  m) e il server allo switch ( $l_3=10$  m), nota la velocità di propagazione dei segnali che si propagano sui mezzi trasmissivi ( $v_p = 2,1 \cdot 10^8 [m/s]$ ) si calcola il ritardo causato da ciascun collegamento:

$$\Delta t_{link\_PC-switch} = \frac{100_{[m]}}{2,1 \cdot 10^8_{[m/s]}} \cong 0,476 \mu s ;$$

$$\Delta t_{link\_switch-switch} = \frac{200_{[m]}}{2,1 \cdot 10^8_{[m/s]}} \cong 0,952 \mu s$$

$$\Delta t_{link\_server-switch} = \frac{10_{[m]}}{2,1 \cdot 10^8_{[m/s]}} \cong 0,0476 \mu s$$

Poiché gli switch operano in modalità *store and forward* essi devono memorizzare ciascun frame prima di ritrasmetterlo, per cui determinano un ritardo uguale alla durata di un frame (trascurando il tempo di trasferimento I->O)

$$\Delta t_{Switch} = \Delta t_{Frame\_dati} = 4,54 \mu s$$

$$\Delta t_{Switch} = \Delta t_{Frame\_ACK} = 0,576 \mu s$$

c) Nel caso in esame, il tempo di andata e ritorno, o RTT, può essere considerato come il tempo che intercorre tra l'invio del primo bit di una PDU e la ricezione dell'ultimo bit della PDU che trasporta la conferma di corretta ricezione (ACK); l'RTT si può quindi calcolare sommando:

- la durata dei frame che trasportano dati
- la durata dei frame che trasportano una conferma di corretta ricezione (ACK)
- i ritardi introdotti dai collegamenti nelle due direzioni
- i ritardi introdotti dagli switch nelle due direzioni, quindi sui frame che trasportano dati e sui frame che trasportano le conferme di corretta ricezione (ACK)

$$RTT = \Delta t_{Frame\_dati} + \Delta t_{tot\_link\_PC-server} + 2\Delta t_{switch\_Frame\_dati} + \Delta t_{Frame\_ACK} + \Delta t_{tot\_link\_server-PC} + 2\Delta t_{switch\_Frame\_ACK} [s]$$

Facendo riferimento alla Figura 4, l'RTT risulta così pari a:

$$RTT = [4,54 + (0,476 + 0,952 + 0,0476)] + 2 \cdot 4,54 + 0,576 + (0,476 + 0,952 + 0,0476) + 2 \cdot 0,576] \cdot 10^{-6} = 18,3 \mu s$$

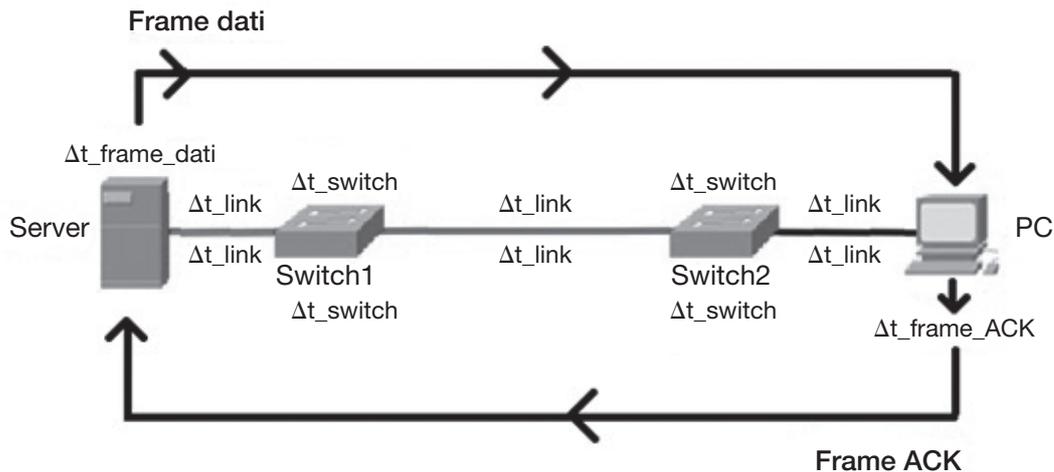
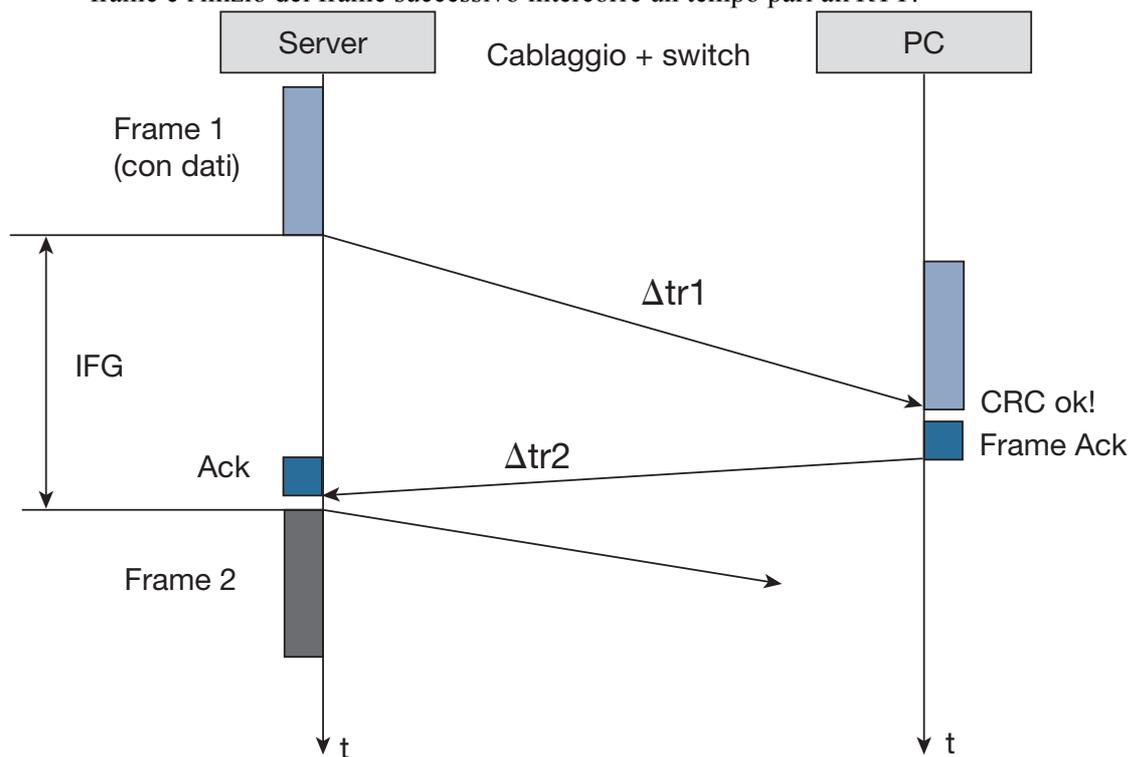


Figura 4 Determinazione del tempo di andata-ritorno o RTT

IV. Poiché il protocollo di applicazione opera con controllo di flusso e correzione d'errore di tipo *stop and wait*, Figura 5, dopo aver trasmesso un frame il server deve attendere l'ACK di conferma di corretta ricezione prima di trasmettere il frame successivo, per cui tra l'inizio di un frame e l'inizio del frame successivo intercorre un tempo pari all'RTT.



$\Delta tr$ : tempo di ritardo totale dovuto a mezzi trasmissivi e agli switch

$$IFG = \Delta tr1 + \Delta tr2 + \Delta t_{Frame\_ACK} \quad IFG: \text{InterFrame Gap}$$

$$RTT = \Delta t_{Frame\_dati} + IFG \quad RTT: \text{Round Trip Time}$$

CRC: Cyclic Redundancy Check

Figura 5 Metodo di correzione d'errore Stop and Wait

Per calcolare quanti bit di informazione (bit del file) si trasmettono al secondo e determinare così la velocità di informazione operiamo nel seguente modo.

- Calcoliamo il numero di frame/s che si trasmettono, che è pari a:

$$N_{Frame/s} = \frac{1}{RTT} = \frac{1}{18,3 \cdot 10^{-6}} \cong 54644,8 \text{ [frame / s]}$$

- calcoliamo il numero di bit di informazione trasferiti in ciascun frame (bit\_info/frame) moltiplicando la dimensione di un blocco dati, espressa in byte, per 8;
- calcoliamo la velocità di informazione a livello di applicazione ( $BR_{app}$ ), nota come *throughput* o *goodput*, cioè la velocità di trasmissione delle informazioni vere e proprie, moltiplicando il numero di frame/s per il numero di bit\_info/s, ottenendo il seguente valore (si veda il cap. 2 par.2 del libro di testo):

$$BR_{App} = (N_{Frame/s}) \cdot (D_{blocco} \cdot 8) = 54644,8 \cdot (512 \cdot 8) = 224 \text{ Mbit / s}$$

Dividendo la dimensione del file (espressa in bit) per la velocità di informazione netta ( $BR_{app}$ ) otteniamo il tempo necessario per trasferire il file, che è risulta pari a:

$$\Delta t_{Trasf\_file} = \frac{D_{File} \cdot 8}{BR_{App}} = \frac{(20 \cdot 10^6) \cdot 8}{224 \cdot 10^6} \cong 0,715 \text{ s}$$

Un modo alternativo di calcolare il tempo di trasferimento del file è quello di calcolare il numero di 7-PDU necessarie per trasferire il file:

$$N_{7-PDU} = \frac{D_{file}}{D_{payload\_7PDU}} = \frac{20 \cdot 10^6}{512} = 39062,5$$

Quindi si devono trasmettere 39062 7-PDU con payload da 512 B e una 7-PDU con payload da 256 B, ciascuna delle quali è incapsulata in un frame.

Se si tiene conto anche dell'IFG (Inter Frame Gap) la durata di un frame si può considerare uguale all'RTT calcolato.

Fa eccezione l'ultimo frame per il quale vanno calcolati:

- la dimensione dell'ultimo frame:

$$D_{frame} = H_{Ethernet} + D_{payl\_Eth} + FCS = (8+6+6+2) + (20+8+2+256) + 4 = 312 \text{ B}$$

- la durata dell'ultimo frame:

$$\Delta t_{Ult.Frame} = \frac{D_{Frame} \cdot 8}{BR} = \frac{312 \cdot 8}{1 \cdot 10^9} \cong 2,5 \text{ } \mu\text{s}$$

- Il tempo necessario per trasferire l'ultimo frame:

$$\Delta t_{trasf\_UF} = [2,5 + (0,476 + 0,952 + 0,0476) + 2 \cdot 2,5] \cdot 10^{-6} = 8,97 \text{ } \mu\text{s}$$

Quindi il tempo necessario a trasferire il file si può anche calcolare come:

$$\Delta t_{Trasf.} = N_{Frame} \cdot RTT + \Delta t_{trasf\_UF} = 39062 \cdot 18,3 \cdot 10^{-6} + 8,97 \cdot 10^{-6} \approx 0,715 \text{ s}$$

- V. Per aumentare la velocità di informazione, o *throughput*, è possibile utilizzare un protocollo di applicazione (come l'FTP) che non effettua la correzione d'errore e il controllo di flusso, ma demanda queste funzioni a un protocollo di trasporto che effettui la correzione d'errore ed il controllo di flusso con il metodo della finestra di trasmissione (come il TCP); si rimanda al cap. 1 par. 6 e par. 7 del libro di testo per i dettagli.

### 3. Proporre delle indicazioni generali per ottenere prestazioni elevate .....

Delle indicazioni generali per ottenere elevate prestazioni nel caso di rete convergente multiservizio, in grado di supportare tutte le forme di comunicazione, possono essere le seguenti (si veda il libro di testo, cap. 3 par. 5.4, par. 5.5, par. 5.6):

- Impiego di un cablaggio in grado di supportare tecnologie 10Gigabit Ethernet: cavi in rame di categoria 6A, fibre ottiche OM4;
- Impiego della tecnologia PoE (*Power over Ethernet*) per alimentare telefoni IP, webcam e access point Wi-Fi, in modo da semplificarne l'installazione (si veda il vol.3 cap. 3, par. 5.3 del libro di testo per i dettagli);
- Impiego della tecnologia 10Gigabit Ethernet sulle dorsali di edificio, di campus e per interconnettere access point Wi-Fi a standard IEEE 802.11ac;
- impiego di switch Layer 2 amministrabili per la suddivisione della rete in VLAN (Virtual LAN) e per l'adozione di adeguate misure di sicurezza a livello 2 (sicurezza fisica, port security, ecc.);
- impiego di switch layer 3 per interconnettere le VLAN (quando ciò è necessario) adottando adeguate politiche di sicurezza;
- implementazione della QoS (*Quality of Service*) per differenziare il traffico e dare priorità maggiore ai flussi audio e video rispetto al normale traffico dati.

Libro di testo consigliato  
Onelio Bertazioli  
Corso di Telecomunicazioni vol. 3  
Ed. Zanichelli

Si consiglia inoltre la consultazione del seguente manuale:  
AA. VV.  
Manuale Cremonese di Informatica e Telecomunicazioni  
Ed. Zanichelli