

Appunti di Fondamenti di Comunicazioni e Internet

Canale 1 · Reti · Prof.ssa Francesca Cuomo

Capitolo 4: Architettura a strati

Autore: Tommaso C.

Appunti tratti dalle lezioni in aula e dal materiale del corso

Argomenti: Strati, servizi e protocolli · Modello OSI

Strati da estremo a estremo e sezione per sezione

Modello Internet a cinque strati · PDU, SDU e PCI

Incapsulamento, overhead e segmentazione

Servizi con e senza connessione

Indice

1	Architettura a strati	1
2	Il modello OSI	2
2.1	Strati da estremo a estremo e sezione per sezione	2
2.2	Protocollo di strato e unità di dati	3
3	I sette strati	4
4	Il modello Internet a cinque strati	6
5	Intestazioni, incapsulamento e overhead	7
5.1	Nei nodi intermedi	8
6	Segmentazione e riassemblaggio	9
7	Servizi con e senza connessione	10
8	Esercizi	11
9	Soluzioni	13

1 Architettura a strati

Definizione – Architettura a strati

Un'**architettura a strati** divide le funzioni di un sistema complesso in **strati** (*layer*), o livelli. Ogni strato realizza un **servizio**:

1. svolgendo determinate funzioni al proprio interno;
2. usando il servizio dello strato **immediatamente inferiore**.

Il servizio dello strato più alto è offerto all'utente: una persona o un altro sistema.

Le reti di telecomunicazione sono un sistema complesso: host, router, server, mezzi trasmissivi e applicazioni diversi devono cooperare. L'architettura a strati, detta anche **modello di riferimento a strati**, dice come sono organizzate le loro funzioni.

Definizione – Proprietà degli strati

- **Modularità**: le funzioni sono raggruppate in strati distinti.
- **Gerarchia**: gli strati sono ordinati. Lo strato N lavora solo quando lo strato $N + 1$ gli chiede un servizio, e per offrirlo usa quello dello strato $N - 1$.
- **Autonomia**: come uno strato realizza il proprio servizio non interessa agli altri strati; a loro interessa solo il servizio offerto.

La gerarchia non è un ordine di importanza: dice in che ordine i servizi si appoggiano l'uno all'altro. Un'applicazione che comunica usa il servizio dello strato sotto, che usa quello dello strato ancora sotto, fino allo strato fisico; nessuno strato funziona se mancano quelli sotto di lui.

Osservazione – Che cosa si guadagna

L'autonomia permette di **sostituire** l'implementazione di uno strato lasciando invariato il resto dell'architettura:

- sistemi collegati in fibra ottica passano al wireless cambiando solo lo **strato fisico**: agli altri strati basta che i bit vengano trasferiti;
- IP versione 4 e IP versione 6 sono due protocolli di rete molto diversi, eppure il secondo prende il posto del primo e la comunicazione continua a funzionare;
- il protocollo applicativo HTTP è stato affiancato da HTTPS, che aggiunge autenticazione e cifratura dei messaggi: cambia solo lo strato di applicazione dei due sistemi, gli strati sotto non fanno nulla di diverso.

Per questo l'architettura si adatta ai cambiamenti tecnologici: è nata negli anni Settanta ed è ancora quella delle reti di oggi.

2 Il modello OSI

Definizione – Modello OSI

Il modello **OSI** (*Open Systems Interconnection*) è il modello di riferimento a **sette strati** per l'interconnessione di sistemi in rete. Nato negli anni Settanta, ha definito i concetti di **strato**, **servizio** e **protocollo**, validi ancora oggi.

Open vuol dire aperto a produttori diversi. Uno smartphone, un portatile e l'access point Wi-Fi a cui entrambi si collegano sono di marche diverse, eppure comunicano, perché seguono lo stesso modello di riferimento.

Osservazione – Organizzazione logica

Gli strati organizzano le **funzioni** che servono all'interconnessione: dicono come comunica un sistema (calcolatore, smartphone, router, access point), non com'è fatto dentro. Aprendo un calcolatore non si trovano sette strati.

2.1 Strati da estremo a estremo e sezione per sezione

Ogni strato esiste in tutto il modello, ma le sue funzioni possono essere implementate in tutti i sistemi attraversati oppure solo in quelli agli estremi della comunicazione.

Definizione – Strati da estremo a estremo e sezione per sezione

- Uno strato **da estremo a estremo** (*end-to-end*) ha le funzioni implementate solo nei due **sistemi terminali**, agli estremi della comunicazione.
- Uno strato **sezione per sezione** ha le funzioni implementate in **tutti i sistemi** attraversati, compresi i nodi intermedi della rete.

Nel modello OSI gli strati 1, 2 e 3 sono sezione per sezione, gli strati 4, 5, 6 e 7 da estremo a estremo.

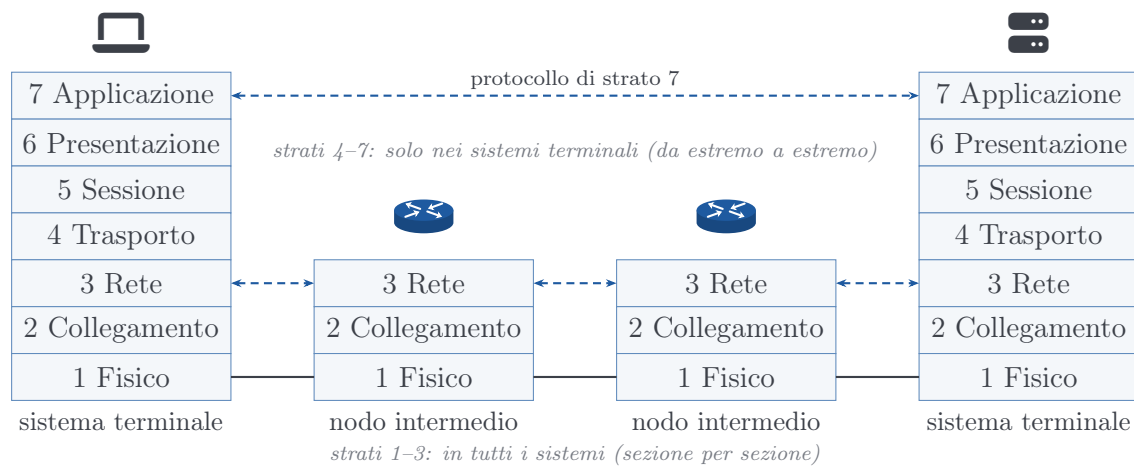


Figura 1: I sette strati OSI su quattro sistemi interconnessi. Le linee tratteggiate uniscono le entità pari di uno stesso strato; quella continua è il mezzo trasmissivo.

2.2 Protocollo di strato e unità di dati

Definizione – Protocollo di strato

In ogni strato le funzioni si svolgono secondo regole, formati e linguaggi comuni: il **protocollo di strato** N . Le entità dello strato N di sistemi diversi (**entità pari**) cooperano secondo questo protocollo e si scambiano una propria **unità di dati**: un insieme di bit organizzato nel formato che il protocollo conosce.

Osservazione – Entità e comunicazione fisica e logica

Un'entità di strato esegue i compiti del protocollo: nello strato fisico è soprattutto hardware, perché deve trasmettere sul mezzo; salendo nella pila è sempre più spesso software installato nei sistemi.

- **Fisicamente** un'entità comunica solo con gli strati **adiacenti** del proprio sistema: lo strato 5 non parla direttamente con lo strato 1.
- **Logicamente** comunica con l'entità pari di un altro sistema, attraverso le informazioni di controllo che si scambiano (Sezione 5).

Un protocollo deve avere una **controparte** in ogni sistema che svolge le funzioni dello strato:

- per uno strato da estremo a estremo, all'altro estremo: se WhatsApp gira su uno smartphone, deve girare anche dall'altra parte, altrimenti le due applicazioni non si parlano;
- per uno strato sezione per sezione, in tutti i sistemi attraversati: il protocollo di rete deve stare negli host e in ogni nodo intermedio.

3 I sette strati

Gli strati si numerano dal basso: lo strato 1 è quello a contatto con il mezzo trasmissivo.

Definizione – Strato 1: fisico

Lo **strato fisico** (*physical layer*) è a diretto contatto con il **mezzo trasmissivo**, cablato (rame, fibra ottica) o wireless. Il suo servizio è **trasferire i bit** sul mezzo, con le funzioni meccaniche, elettromagnetiche o ottiche e procedurali che servono.

Agli strati superiori non interessa *come* i bit viaggiano, luce in una fibra oppure onda elettromagnetica: interessa che arrivino. Per questo si cambia mezzo cambiando solo lo strato fisico (osservazione «Che cosa si guadagna», Sezione 1).

Definizione – Strato 2: collegamento

Lo **strato di collegamento** (*data link layer*) realizza il **trasferimento affidabile** delle informazioni su un singolo collegamento: può rivelare e correggere gli errori e garantire che le informazioni arrivino in sequenza.

Osservazione – Accesso al mezzo condiviso

Quando più utenti condividono lo stesso collegamento, come gli smartphone collegati allo stesso access point Wi-Fi, l'accesso va regolato, altrimenti le trasmissioni interferiscono. Lo fanno le funzioni di **controllo di accesso al mezzo** (*Medium Access Control*, **MAC**) dello strato 2. Su un collegamento usato da un solo sistema, per esempio un portatile collegato con un cavo al proprio modem, le funzioni MAC possono mancare.

Definizione – Strato 3: rete

Lo **strato di rete** (*network layer*) gestisce la rete. Le sue funzioni chiave sono:

- **l'indirizzamento**: gli indirizzi che permettono di mandare l'informazione da una parte all'altra della rete;
- **l'instradamento**: trovare la strada dei pacchetti verso la destinazione.

Definizione – Strato 4: trasporto

Lo **strato di trasporto** (*transport layer*) garantisce l'affidabilità dei **flussi di dati** fra i due estremi della comunicazione.

Anche lo strato 2 dà affidabilità, ma su un solo collegamento. In uno streaming video servono due cose: che i bit di ogni frame siano corretti, compito dello strato 2, e che l'intero flusso arrivi in ordine e completo, compito dello strato 4.

Definizione – Strati superiori del modello OSI

- **Strato 5, sessione**: gestisce la sessione, cioè il flusso di dati di una comunicazione che dura nel tempo; per esempio sincronizza l'audio con il video o riprende un flusso interrotto dal punto in cui si era fermato.
- **Strato 6, presentazione**: presenta l'informazione allo strato applicativo in una forma di cui l'applicazione interpreta il significato (per esempio con cifratura e compressione).
- **Strato 7, applicazione**: contiene le applicazioni, che offrono servizi agli utenti, persone o altri sistemi: inviare una mail, vedere un film, usare WhatsApp.

4 Il modello Internet a cinque strati

Definizione – Modello Internet

Nel **modello Internet** le funzioni di sessione, presentazione e applicazione dell'OSI non sono eliminate, ma **riunite** in un unico strato, lo **strato 5 di applicazione**. Gli strati sono cinque: applicazione, trasporto, rete, collegamento e fisico.

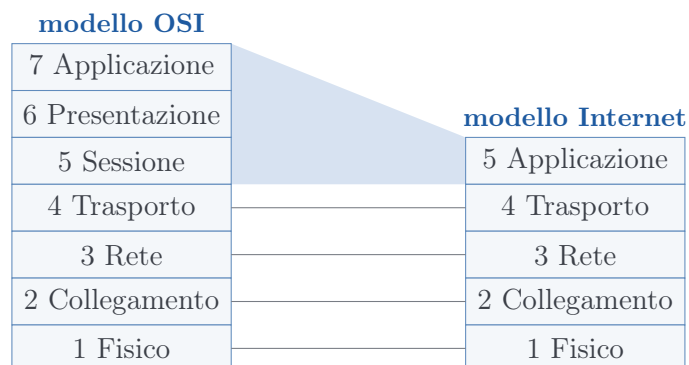


Figura 2: Dai sette strati OSI ai cinque del modello Internet: i tre strati più alti diventano lo strato di applicazione, gli altri restano.

N.	Strato	Unità di dati	Protocolli	Tipo
5	applicazione	messaggio	uno per applicazione	da estremo a estremo
4	trasporto	segmento	TCP, UDP	da estremo a estremo
3	rete	pacchetto	IP	sezione per sezione
2	collegamento	frame (trama)	molti	sezione per sezione
1	fisico	bit	uno per mezzo	sezione per sezione

Tabella 1: Gli strati del modello Internet.

TCP sta per *Transmission Control Protocol*, UDP per *User Datagram Protocol*, IP per *Internet Protocol*. Il TCP lavora da estremo a estremo, quindi deve stare nei due host; l'IP deve stare in ogni sistema attraversato, host e router. Il libro di Kurose e Ross chiama **datagramma** l'unità di dati dello strato di rete.

Nota

In italiano il frame si chiama anche *trama*, ma trama è anche il gruppo di slot che si ripete periodicamente nel TDM (Capitolo 2). Sono due cose diverse: qui **frame** è l'unità di dati dello strato 2, **trama** il gruppo di slot dello strato fisico.

5 Intestazioni, incapsulamento e overhead

Definizione – Informazione di protocollo e intestazione

I dati trasferiti contengono l'**informazione da mandare** e l'**informazione di protocollo**, che serve allo strato per gestirla. Ogni protocollo mette la propria informazione di protocollo soprattutto in un'**intestazione** (*header*), all'inizio della sua unità di dati.

Una mail ha un formato: destinatario, eventuali indirizzi in copia, oggetto, testo, allegati. Il testo e l'oggetto sono l'informazione da mandare; i campi del formato, uguali per tutte le mail, permettono al protocollo di riconoscere dove sono il destinatario e il contenuto. Un indirizzo scritto nel testo della mail non la fa arrivare a quel destinatario.

Definizione – PDU, SDU e PCI

L'unità di dati dello strato N si chiama **N -PDU** (*Protocol Data Unit*). È formata da:

- la **N -PCI** (*Protocol Control Information*), l'informazione di protocollo dello strato N , cioè la sua intestazione;
- la **N -SDU** (*Service Data Unit*), i dati oggetto del servizio dello strato N : l'unità di dati ricevuta dallo strato superiore.

$$(N)\text{-PDU} = (N)\text{-PCI} + (N)\text{-SDU}, \quad (N)\text{-SDU} = (N + 1)\text{-PDU}.$$

Il messaggio, PDU dello strato 5, diventa la SDU dello strato 4; lo strato 4 aggiunge la propria PCI e forma il segmento, che diventa la SDU dello strato 3, e così via fino al flusso di bit. Ogni strato mette nella PCI ciò che serve al proprio protocollo: lo strato 2 le informazioni per il controllo d'errore, lo strato 3 l'indirizzo di rete. Anche lo strato fisico può avere le proprie informazioni di controllo, per esempio per distinguere il flusso di bit in arrivo.

Osservazione – Lo strato legge solo la PCI

Uno strato lavora sulla propria PCI e di norma **non legge la SDU**: per lui è solo il contenuto da trasportare, anche se contiene a sua volta l'intestazione dello strato sopra. Fa eccezione una funzione che deve guardare i dati, come il controllo d'errore. Per questo la SDU può anche essere cifrata senza che lo strato smetta di funzionare.

Definizione – Incapsulamento

1. **In trasmissione**, l'unità di dati scende la pila: ogni strato aggiunge la propria intestazione all'unità di dati ricevuta dallo strato superiore e passa il tutto allo strato inferiore.
2. **In ricezione**, l'unità di dati risale la pila: ogni strato legge la propria intestazione, la usa, la toglie e passa il resto allo strato superiore.

All'applicazione di destinazione arriva solo il messaggio applicativo.

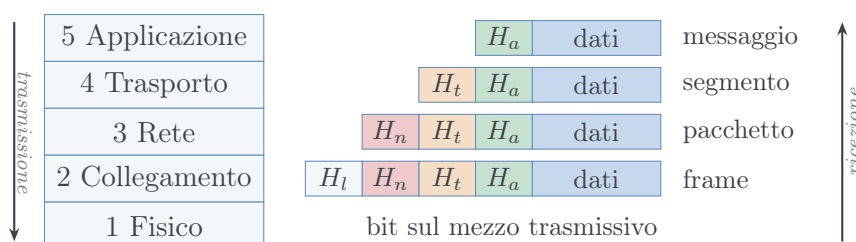


Figura 3: Incapsulamento: scendendo, ogni strato aggiunge la propria intestazione (H_a applicazione, H_t trasporto, H_n rete, H_l collegamento); risalendo, la toglie.

Definizione – Overhead

L'**overhead** è l'informazione aggiuntiva, come le intestazioni, che la comunicazione deve trasportare per funzionare. Occupa **spazio**, **banda** ed **energia**, ma non è informazione per l'utente.

Le intestazioni fanno parte della lunghezza L di un'unità di dati: l'overhead allunga anche il ritardo di trasmissione $d_{\text{trasm}} = L/R$ su ogni collegamento.

5.1 Nei nodi intermedi

Definizione – Decapsulamento

Il **decapsulamento** è l'operazione inversa dell'incapsulamento: salendo, ogni strato legge la propria PCI, la usa, la toglie e passa la SDU allo strato superiore. Un nodo intermedio decapsula fino al **proprio strato più alto**, ne svolge le funzioni e poi riscende la pila incapsulando di nuovo, verso il sistema successivo.

Nella Figura 4 il messaggio viene incapsulato una volta in A, poi uno switch risale fino allo strato 2 e un router fino allo strato 3; solo B risale fino allo strato 5. Incapsulare e decapsulare aggiunge e toglie informazione, ma richiede anche **tempo**: anche per questo i nodi intermedi hanno solo gli strati più bassi, e le funzioni che servono soltanto agli estremi stanno negli strati da estremo a estremo.

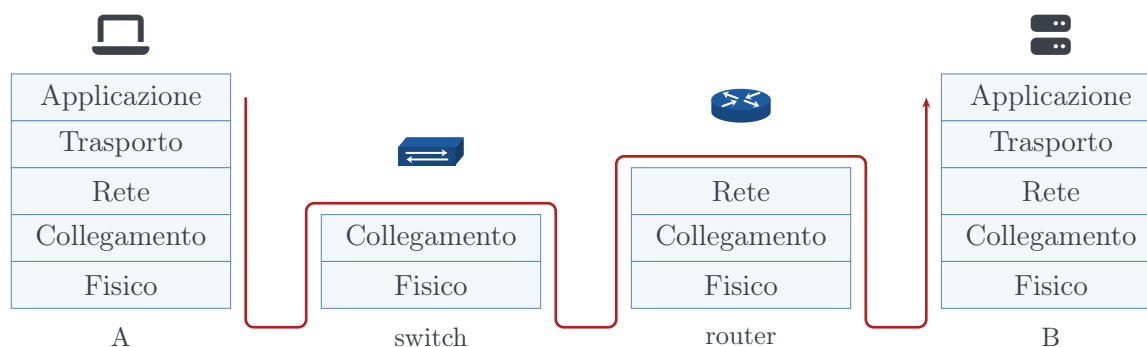


Figura 4: Da A a B attraverso uno switch, che risale fino allo strato 2, e un router, che risale fino allo strato 3. Solo B arriva allo strato di applicazione.

6 Segmentazione e riassemblaggio

Definizione – Segmentazione e riassemblaggio

Il formato di uno strato fissa la lunghezza della SDU: **fissa** oppure **variabile fino a un massimo**. Se l'unità ricevuta dallo strato superiore non entra in una SDU:

1. in trasmissione la **segmentazione** la divide in più parti, ciascuna nella SDU di una propria PDU;
2. in ricezione il **riassemblaggio** rimette insieme le parti nell'ordine giusto.

Per ritrovare l'ordine, la PCI di ogni parte contiene un **numero di segmento**.

Proposizione – Come si divide

- Con **lunghezza massima**, tutte le parti hanno la lunghezza massima tranne l'ultima, più corta.
- Con **lunghezza fissa**, tutte le parti hanno la stessa lunghezza; se l'ultima non riempie la SDU, il resto si completa con bit di **riempimento** (*padding*), che non portano informazione.

Un messaggio di 3800 bit in SDU di al massimo 400 bit dà quindi dieci parti, nove da 400 e una da 200, non dieci da 380. Il riempimento è overhead come le intestazioni: occupa banda senza portare dati.

Definizione – Frammentazione IP

Quando un pacchetto IP non entra nella SDU dello strato sotto, IP lo divide in **frammenti**. Si divide solo il campo dati del pacchetto: ogni frammento **ripete l'intera intestazione IP**, così è un pacchetto autonomo che lo strato di rete sa trattare da solo.

Se la SDU dello strato 2 è lunga S e l'intestazione IP H_{IP} , ogni frammento porta $S - H_{IP}$ bit del campo dati del pacchetto; le intestazioni ripetute sono overhead in più. L'Esercizio 1 segue un file attraverso UDP, IP, strato 2 e un circuito TDM, con segmentazione, frammentazione e riempimento.

7 Servizi con e senza connessione

Definizione – Servizio con e senza connessione

- Un servizio di strato è **con connessione** (*connection oriented*) se le due entità pari si accordano prima di scambiarsi i dati: stabiliscono una **connessione** e su di essa trasferiscono i dati.
- È **senza connessione** (*connectionless*) se l'entità manda i dati senza alcun accordo: ogni unità di dati viaggia per conto suo.

Definizione – Primitive di servizio

Una connessione si stabilisce con quattro primitive fra le entità $N + 1$ e lo strato N dei due sistemi:

1. **richiesta**: l'entità che vuole comunicare la passa allo strato sotto;
2. **indicazione**: nell'altro sistema lo strato sotto la consegna all'entità pari;
3. **risposta**: l'entità pari, se accetta, risponde allo strato sotto;
4. **conferma**: la risposta arriva all'entità che ha chiesto.

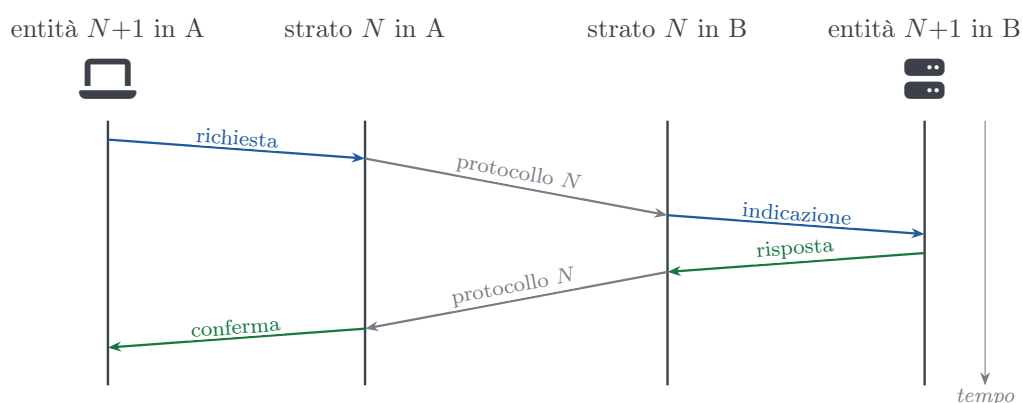


Figura 5: Le quattro primitive che stabiliscono una connessione: la richiesta di A arriva a B come indicazione, la risposta di B arriva ad A come conferma.

La connessione serve quando lo scambio non si esaurisce in un solo messaggio ma è un flusso di dati: il ricevente può dare riscontro di ciò che ha ricevuto e, con il **controllo di flusso** di TCP, chiedere al mittente di rallentare. Senza connessione si risparmia la negoziazione, che richiede tempo e può anche fallire se l'altra parte non risponde.

	Con connessione	Senza connessione
Accordo preventivo	sì: prima la connessione, poi i dati	no: subito i dati
Garanzie	riscontri; controllo di flusso (TCP)	né consegna né ordine
Vantaggio	affidabilità	più veloce, nessuna negoziazione
Esempi	TCP (strato 4)	IP (strato 3), UDP (strato 4)
Applicazioni	streaming, trasferimento di file	chi può farne a meno

Tabella 2: Servizi con e senza connessione a confronto.

Riepilogo

- **Architettura a strati:** ogni strato offre un servizio a quello sopra, usando il servizio di quello immediatamente sotto.
- **Proprietà:** modularità, gerarchia (ordine dei servizi), autonomia (conta il servizio, non come è realizzato).
- **Modello OSI:** sette strati; 1–3 sezione per sezione (tutti i sistemi), 4–7 da estremo a estremo (solo i sistemi terminali).
- **Modello Internet:** cinque strati; sessione e presentazione sono riunite nell'applicazione. Unità: messaggio, segmento, pacchetto, frame, bit.
- **PDU:** $(N)\text{-PDU} = (N)\text{-PCI} + (N)\text{-SDU}$, e la $(N)\text{-SDU}$ è la $(N + 1)\text{-PDU}$.
- **Incapsulamento:** scendendo ogni strato aggiunge la sua PCI, risalendo la toglie; un nodo intermedio risale fino al suo strato più alto. L'overhead occupa spazio, banda ed energia.
- **Segmentazione:** con lunghezza massima l'ultima parte è più corta, con lunghezza fissa si riempie di padding; ogni frammento IP ripete l'intestazione.
- **Servizi:** con connessione (richiesta, indicazione, risposta, conferma; TCP) o senza (IP, UDP).

8 Esercizi

Esercizio 1 – Un file su una rete a circuito

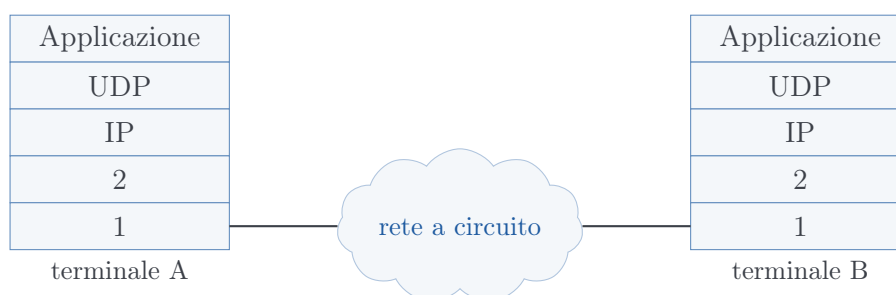
Due terminali IP sono interconnessi attraverso una rete a circuito; i terminali hanno l'architettura in figura. Siano:

- $L_{UDP} = 400$ bit la dimensione massima del campo informativo dei segmenti UDP e $H_{UDP} = 20$ bit la loro intestazione;
- $L_{IP} = 420$ bit la dimensione massima del campo informativo dei pacchetti IP e $H_{IP} = 40$ bit la loro intestazione;

- $L_2 = 250$ bit la dimensione *costante* del campo informativo delle unità di dati di strato 2 e $H_2 = 10$ bit la loro intestazione.

Lo strato 1 usa una moltiplicazione statica (TDM) con 5 slot organizzati in trame di periodo 10 ms. Uno slot trasferisce per intero un'unità di dati di strato 2; uno dei cinque slot della trama è dedicato alle informazioni di segnalazione dello strato fisico. Nel passaggio dallo strato IP allo strato 2 si segue lo schema di frammentazione di IP. Per trasferire un file applicativo di 3800 bit:

1. rappresentare graficamente le unità di dati necessarie nei quattro strati;
2. calcolare la percentuale di extra-informazione complessiva, compresa quella dello strato fisico;
3. calcolare il tempo minimo per trasferire il file, trascurando il ritardo dei nodi intermedi della rete a circuito.



Soluzione a pagina 13 →

Esercizio 2 – Appello del 12/01/2023, Canale 1, Prof.ssa Francesca Cuomo, domanda 9

Il modello OSI mira a rappresentare:

- a. le interazioni che avvengono tra la CPU di un computer e i processi del sistema;
- b. le interazioni che avvengono tra sistemi differenti interconnessi in rete;
- c. esclusivamente gli scambi di messaggi che si hanno tra host e server di Internet;
- d. le interazioni tra le applicazioni degli utenti e i sistemi che servono a farle comunicare.

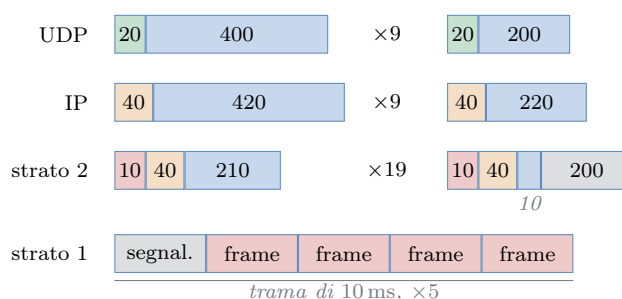
Soluzione a pagina 14 →

9 Soluzioni

Soluzione dell'Esercizio 1 – Un file su una rete a circuito

1. *Unità di dati.* Si scende la pila dall'alto.

- **UDP:** $3800 = 9 \cdot 400 + 200$, quindi 10 segmenti: nove con $20 + 400 = 420$ bit e l'ultimo con $20 + 200 = 220$ bit.
- **IP:** ogni segmento entra per intero nel campo di un pacchetto ($420 \leq L_{IP}$), quindi 10 pacchetti: nove da $40 + 420 = 460$ bit e l'ultimo da $40 + 220 = 260$ bit.
- **Strato 2:** un pacchetto non entra nel campo di 250 bit e va frammentato. Ogni frammento ripete l'intestazione IP, quindi porta $250 - 40 = 210$ bit del campo del pacchetto. I primi nove pacchetti ($420 = 210 + 210$) danno 18 frammenti; l'ultimo ($220 = 210 + 10$) ne dà altri due. In tutto 20 unità da $10 + 250 = 260$ bit; la ventesima ha nel campo $40 + 10$ bit utili e $250 - 50 = 200$ bit di riempimento (*padding*).
- **Strato 1:** ogni trama ha 4 slot per i dati, quindi le 20 unità occupano $20/4 = 5$ trame.



2. *Extra-informazione.* Si sommano i bit che non sono del file:

Voce	bit
intestazioni UDP, $10 \cdot 20$	200
intestazioni IP, $20 \cdot 40$ (10 originali e 10 ripetute)	800
intestazioni di strato 2, $20 \cdot 10$	200
riempimento della ventesima unità	200
slot di segnalazione, $5 \cdot 260$	1300
totale	2700

Lo slot di segnalazione è lungo come uno slot di dati, cioè 260 bit. In tutto si trasmettono $5 \cdot 5 \cdot 260 = 6500$ bit = $3800 + 2700$. Rispetto al totale trasmesso l'extra-informazione è

$$\frac{2700}{6500} \approx \boxed{41,5\%},$$

rispetto ai soli dati del file $2700/3800 \approx 71\%$.

3. *Tempo minimo*. Servono 5 trame consecutive da 10 ms:

$$T = 5 \cdot 10 \text{ ms} = \boxed{50 \text{ ms}}.$$

[← Torna all'Esercizio 1, pagina 11](#)

Soluzione dell'Esercizio 2 – Appello del 12/01/2023, Canale 1, Prof.ssa Francesca Cuomo, domanda 9

Il modello OSI è il modello di riferimento per l'*interconnessione* di sistemi in rete: organizza le funzioni che servono perché sistemi diversi, anche di produttori diversi, comunichino.

- a. No: il modello non descrive com'è fatto un sistema dentro, ma come comunica con gli altri.
- c. No: non riguarda solo Internet né solo host e server; gli strati 1–3 sono implementati anche nei nodi intermedi, come i router.
- d. No: le applicazioni sono solo lo strato 7; il modello comprende anche gli strati sotto, fino al trasferimento dei bit sul mezzo.

Risposta: ☒ b.

[← Torna all'Esercizio 2, pagina 12](#)