

# ***Reti di Telecomunicazioni 1***

***Corso "on-line" - AA2006/07  
Blocco 7 (v3)***

***Ing. Stefano Salsano  
e-mail: stefano.salsano@uniroma2.it***

1

## **● Architetture e protocolli di comunicazione**

- » **Introduzione**
- » **Funzioni di un processo di comunicazione**
- » **La stratificazione dell'architettura**
- » **Flussi di informazioni nel modello a strati**
- » **Le unità di informazione**
- » **Primitive di servizio e tipi di servizio**

2

# Flussi informativi

- Una (N)-entità è impegnata nella gestione di due flussi informativi
  - » 1) con entità appartenenti agli strati adiacenti
  - » 2) con entità alla pari
- Nel primo caso il trasferimento è diretto; nel secondo caso il trasferimento è indiretto usando il servizio offerto dallo strato inferiore

3

**Il trasferimento tra entità alla pari residenti in sistemi diversi costituisce un “protocollo”.**

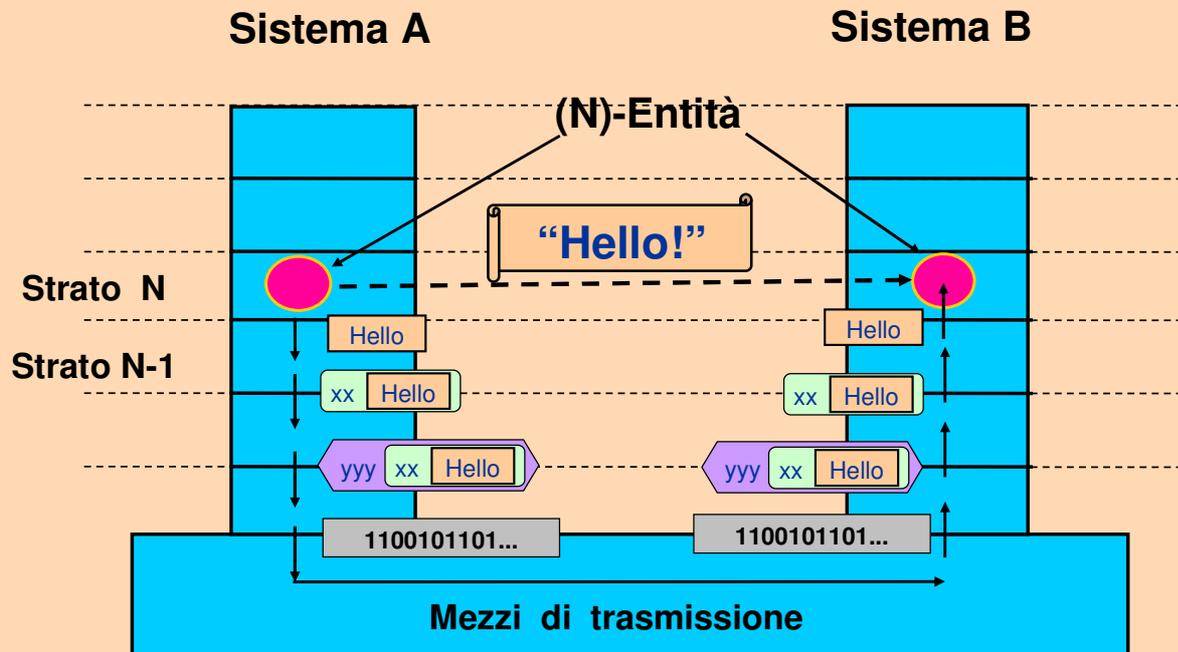
**Il trasferimento tra entità in livelli adiacenti avviene all'interno dello stesso sistema.**

**L'attività di standardizzazione riguarda solo i colloqui tra entità dello stesso strato, cioè i protocolli.**

**I due flussi informativi (con entità adiacenti e con entità alla pari) avvengono contemporaneamente. L'obiettivo è scambiare informazione con una entità remota (alla pari). Questo scambio di informazione è indiretto, avviene grazie ad uno scambio “diretto” che è quello tra entità adiacenti.**

**La slide successiva mostra i due tipi di flussi informativi.**

# Flussi informativi



5

Nella slide precedente si vede una (N)-entità nel sistema A che trasferisce una informazione ("Hello!") al sistema B remoto.

La (N)-entità nel sistema A invia questa informazione alla (N-1)-entità che si trova nello stesso sistema A ma al livello immediatamente inferiore.

La (N-1)-entità si occupa di trasferire questa informazione alla corrispondente (N-1)-entità nel sistema B remoto. Nel fare questo svolge alcune funzioni proprie dello strato N-1 e deve quindi aggiungere delle informazioni al messaggio originale ("Hello!"), nella figura è rappresentato un nuovo messaggio "xxHello!" che viene scambiato tra le entità N-1.

A sua volta la (N-1)-entità nel sistema A non trasferisce direttamente le informazioni alla (N-1)-entità nel sistema remoto, ma invia questa informazione al livello immediatamente inferiore nello stesso sistema A.

Questo procedimento viene iterato più volte fino a giungere al livello più basso, quello dei mezzi trasmissivi, in cui avviene fisicamente il trasferimento dal sistema A al sistema B.

Si osservi come l'informazione trasferita si "arricchisca" man mano che si scende nei livelli. Questo è dovuto al fatto che i vari strati forniscono i loro servizi e per far questo devono aggiungere informazione all'informazione originale.

L'informazione "aggiunta" viene detta "extra-informazione" o "overhead". Dal punto di vista delle risorse trasmissive questo overhead ha un "costo": andranno trasmessi più bit di quelli strettamente necessari per codificare l'informazione da trasferire. È opportuno quindi, laddove possibile, limitare questo costo nella progettazione di una architettura di rete e dei suoi protocolli, ma ovviamente una parte di extra-informazione sarà sempre necessaria per realizzare nella rete le funzioni che supportano i processi di comunicazione.

## Tipi di flussi informativi

- Informazioni di dati:

sono l'oggetto primario dello scambio per le finalità del processo di comunicazione

- Informazioni di controllo:

hanno scopo di coordinamento delle azioni da svolgere a cura delle entità secondo gli obiettivi architetturali

Quando si deve trasferire una informazione, in aggiunta all'informazione stessa si aggiungono altre informazioni per consentire che la comunicazione avvenga in modo corretto e realizzare ad esempio le funzioni che abbiamo analizzato nella lezione precedente.

Si distinguono quindi rispettivamente le informazioni di dati e le informazioni di controllo.

Vedremo che questa distinzione si applica ripetutamente ai vari strati della architettura. All'interno di ogni strato è possibile individuare il flusso di informazione di dati e il flusso di informazioni di controllo relativi allo strato in questione.

Il flusso di informazione di dati (o "utile") di uno strato trasporta le informazioni per conto dello strato immediatamente superiore

## Tipi di flussi informativi

Le informazioni di dati si distinguono in:

- Dati di utente

sono le informazioni di dati che sono trasferite tra entità alla pari nell'ambito di un servizio di strato e a favore delle entità appartenenti allo strato superiore (queste ultime sono "utenti" del servizio di strato)

- Dati di interfaccia

sono le informazioni di dati che sono trasferite tra entità residenti nello stesso sistema e appartenenti a strati adiacenti

# Tipi di flussi informativi

Le informazioni di controllo si distinguono in:

- Informazioni di protocollo (PCI, Protocol Control Information)

sono le informazioni di controllo scambiate tra entità alla pari e corrispondenti alle regole di interazione previste nel pertinente protocollo di strato

- Informazioni di interfaccia

sono le informazioni di controllo scambiate tra entità residenti nello stesso sistema e appartenenti a strati adiacenti

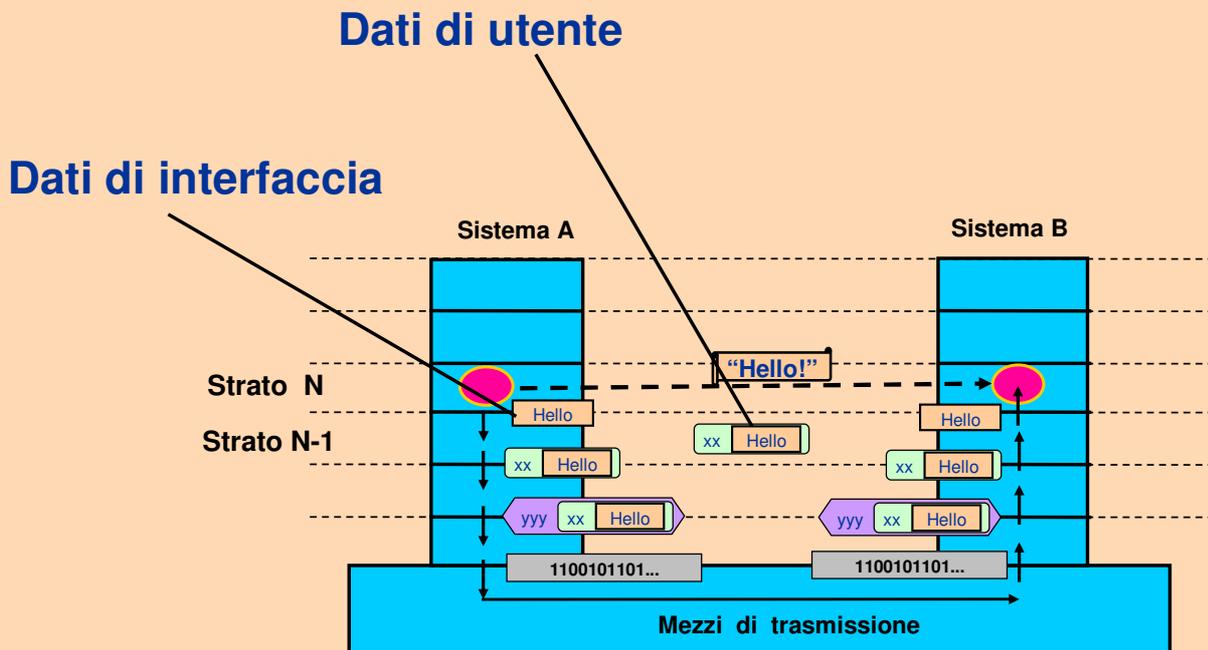
Le informazioni di dati vengono chiamate “dati di utente” o “dati di interfaccia” a seconda se si fa riferimento allo scambio tra entità alla pari (cioè al protocollo) o allo scambio tra entità adiacenti.

Ad esempio nella slide successiva considerando il livello N-1 i “dati di utente” corrispondono ad “Hello!” e vengono trasferiti insieme alle “informazioni di protocollo” (“xx”) tra le due entità del livello N-1.

La stessa informazione (“Hello!”) viene chiamata “dati di interfaccia” nella interfaccia tra il livello N-1 e il livello N.

Le “informazioni di interfaccia” scambiate tra i vari livelli non sono mostrate per non complicare la figura. Si tenga inoltre presente che tali “informazioni di interfaccia” non sono oggetto di standardizzazione e sono realizzate in modo libero da chi fornisce i sistemi. Per questo rivestono una importanza minore rispetto alle informazioni di protocollo nell’analisi e nella progettazione di una rete di telecomunicazioni.

# Informazioni di dati



13

## ● Architetture e protocolli di comunicazione

- » Introduzione
- » Funzioni di un processo di comunicazione
- » La stratificazione dell'architettura
- » Flussi di informazioni nel modello a strati
- » **Le unità di informazione**
- » Primitive di servizio e tipi di servizio

14

## Unità di dati

- Le informazioni di dati o di controllo, che sono scambiate in un processo di comunicazione, sono strutturate in unità, che sono specifiche di ogni strato

15

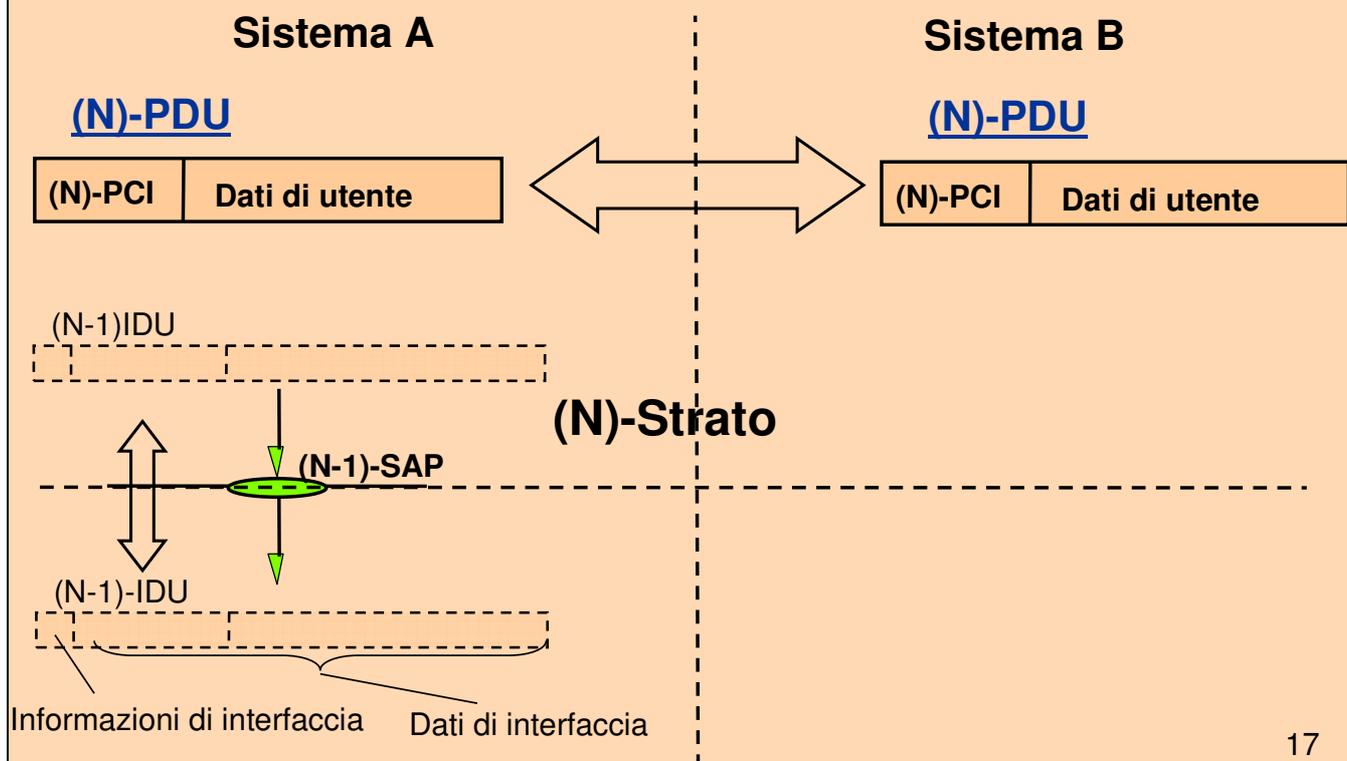
## Unità di dati

Con riferimento all'(N)-strato si hanno

- (N)-PDU, (N)-Protocol Data Unit:
  - » consentono all'(N)-entità, nello svolgimento dell'(N)-servizio, di trasferire una (N)-PCI e, possibilmente, dati di (N)-utente
- (N)-IDU, (N)-Interface Data Unit:
  - » riguardano le informazioni trasmesse attraverso un (N)-SAP

16

## Unità di dati



17

Le Protocol Data Unit (PDU) supportano il flusso informativo tra entità alla pari (cioè il “protocollo”). In una architettura di comunicazione, esistono ovviamente PDU diverse per i vari strati.

Dal momento che il flusso informativo tra entità alla pari si compone di “dati di utente” e “informazioni di controllo”, le PDU supporteranno il trasporto di entrambi i tipi di informazione.

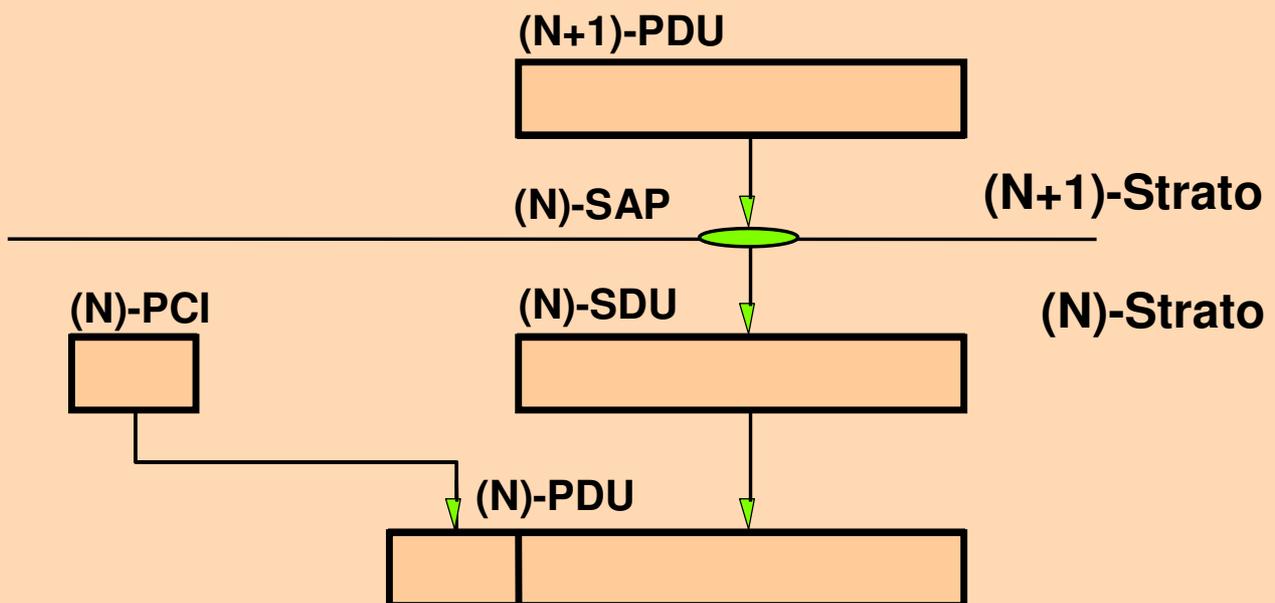
La slide precedente riporta anche la (N-1) Interface Data Unit, composta dai “dati di interfaccia” che corrispondono alla (N)-PDU e dalle “informazioni di interfaccia”. Ripeto ancora che la definizione delle IDU riveste una importanza minore ai fini della standardizzazione rispetto a quella delle PDU (e dei protocolli), dal momento che è importante fissare le regole con cui i sistemi remoti comunicano tra loro mentre si può lasciare libero il modo con cui le entità all'interno dello stesso sistema si scambiano le informazioni.

## Unità di dati

- L'unità di dati di servizio (SDU, Service Data Unit):
  - » è una porzione dei dati di interfaccia che l'entità di uno strato trasferisce a una entità dello strato inferiore nello stesso sistema affinché questa provveda a inoltrarla a destinazione
  - » lo strato inferiore provvede a trasferire la SDU come dati di utente all'interno della sua PDU

19

## Relazioni tra unità di dati in strati adiacenti



20

Come si può vedere dalla slide precedente la PDU di un certo livello, nella slide il livello (N+1), viene passata al livello inferiore (N) attraverso il punto di accesso (N)-SAP. In questa operazione viene chiamata (N)-SDU. Nella figura si vede come la (N)-SDU corrisponde esattamente alla (N+1)-PDU.

La (N)-SDU viene inserita all'interno della (N)-PDU, in particolare rappresenta i "dati di utente" all'interno della (N)-PDU. Il livello N completa la (N)-PDU aggiungendo le "informazioni di protocollo" cioè le (N)-PCI. Nella slide precedente si ha una corrispondenza "uno ad uno tra (N)-SDU e (N)-PDU, questo non sempre è vero come vedremo poco più avanti.

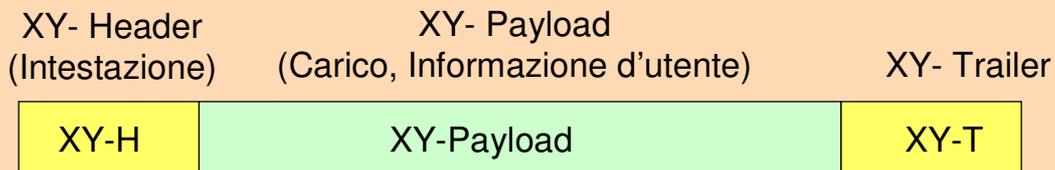
La (N)-PDU è quindi costituita da (N)-PCI e dai dati di utente detti (N)-SDU.

Si noti che una (N)-PDU può essere anche costituita solo dalla (N)-PCI se deve trasportare solo informazioni di controllo. Può infatti servire alle (N)-entità di scambiarsi informazioni per coordinare la comunicazione, senza trasportare dati di utente.

## Unità di dati

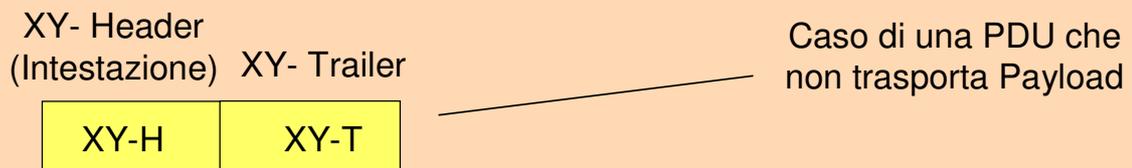
	Unità di dati	Informazione di controllo	Informazione di dati
<b>(N)-(N)</b> Entità alla pari	<b>(N)-PDU</b> Unità di dati dell'(N)-protocollo	<b>(N)-PCI</b> Informazione di controllo dell'(N)-protocollo	Dati dell'(N)-utente
<b>(N+1)-(N)</b> Entità di strati adiacenti	<b>(N)-IDU</b> Unità di dati dell'(N)-interfaccia	Informazione di controllo dell'(N)-interfaccia	Dati dell'(N)-interfaccia

## Formato generale dell'unità di dati (PDU) del generico protocollo XY



Header+Trailer = PCI    Overhead o Extra-informazione  
Payload                    Carico utile, Informazione d'utente

Header+Trailer +Payload = PDU



23

**La slide precedente mostra una unità dati di un ipotetico protocollo in modo più generico, riportando la nomenclatura utilizzata.**

**Si vede che la informazione di protocollo (PCI) è in genere localizzata all'inizio della unità dati (e viene detta "Intestazione" o "Header") o alla fine (e viene detta "Trailer").**

**Come dicevamo una PDU può anche non trasportare carico utile, ma essere utilizzata nell'ambito di qualche funzione realizzata dallo strato. Un esempio è costituito dai servizi con connessione (vedi slide successiva) che richiedono l'instaurazione appunto della connessione prima di poter effettuare il trasferimento della informazione. Uno dei modi possibili per instaurare la connessione tra due (N)-entità è quello di scambiarsi dei messaggi di controllo utilizzando apposite PDU che in genere non trasportano informazione utile.**

## Connessione e senza

- Il trasferimento di informazione tra entità in un dato strato può avvenire con connessione o senza.
- I diversi strati possono operare con o senza connessione in modo indipendente.

**Nella lezione 5 abbiamo introdotto il concetto di connessione nel modo seguente:**

*Nel trasferimento con connessione esiste un accordo “preventivo” tra chi trasmette, chi riceve ed eventualmente la rete che consente il trasferimento. Ci deve essere quindi una fase di “instaurazione” della connessione prima che possa avvenire il trasferimento di informazione. Al termine della fase di trasferimento la connessione può essere “abbattuta” (“rilasciata”).*

**Questo concetto si applica ora alla comunicazione tra entità in un dato strato. Il trasferimento di informazione in uno strato può quindi avvenire “con connessione” o “senza connessione” a seconda se le entità devono stabilire l’associazione tra di loro o meno. Ogni strato può operare con connessione o senza indipendentemente dagli altri. Ad esempio uno strato può lavorare con connessione sfruttando i servizi di uno strato senza connessione, o viceversa uno strato può operare senza connessione al di sopra di uno strato con connessione.**

## Relazioni tra livelli e unità dati

Analizziamo le possibili relazioni tra uno strato “utente” e uno strato sottostante “fornitore del servizio”

- **Multiplicazione**
- **Suddivisione**
- **Frammentazione**
- **Aggregazione**

27

**La relazione tra uno strato “utente” e lo strato sottostante “fornitore del servizio” o “servente” può essere più complicata rispetto al semplice trasporto di una PDU all’interno della SDU dello strato servente (mappaggio “uno-ad-uno” visto in precedenza.**

**In particolare si possono realizzare le seguenti funzioni.**

**Con riferimento alla relazione tra le connessioni di livello (N+1) e le connessioni di livello (N), si può verificare una “moltiplicazione” oppure una “suddivisione”.**

**Con riferimento al numero di PDU di livello (N+1) e quello di livello (N), si può verificare una “segmentazione” oppure una “aggregazione”.**

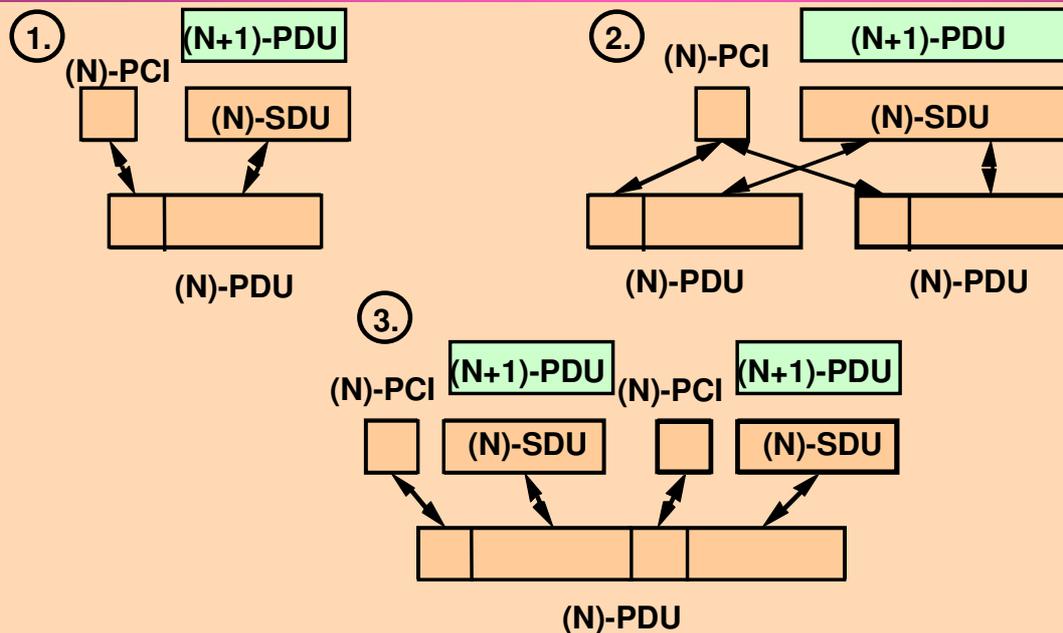
**Si ha moltiplicazione quando più flussi di informazione di uno strato (N) sono trasportati al di sopra di una singola connessione dello strato sottostante (N-1). Abbiamo già introdotto il concetto di moltiplicazione, che ha in generale l'obiettivo di rendere più economico il trasferimento della informazione grazie alla condivisione di una risorsa tra più utilizzatori.**

**Nel caso della moltiplicazione è necessario inserire nell'informazione di controllo quanto necessario per separare i diversi flussi all'uscita della (N-1) connessione. Bisognerà quindi avere degli "identificativi di flusso".**

**L'operazione di suddivisione serve invece a trasportare un certo flusso di informazione di strato (N) su più connessioni di strato (N-1). Ad esempio questo può essere necessario se la capacità della connessione di strato (N-1) non è sufficiente per il flusso di strato N.**

**Nel caso della operazione di suddivisione è necessario aggiungere nell'informazione di controllo quanto necessario per ricombinare il flusso in maniera corretta. Ad esempio potrà essere necessario inserire dei "numeri di sequenza" per ricostruire la sequenza corretta dell'informazione.**

# Segmentazione e aggregazione



1. - Corrispondenza uno a uno tra (N)-SDU e (N)-PDU.
2. - Funzioni di segmentazione e ricostruzione.
3. - Funzioni di aggregazione e disaggregazione.

31

Le operazioni di segmentazione e di aggregazione sono necessarie per adattare la dimensione delle unità dati tra strati adiacenti.

Se le unità dati hanno dimensioni compatibili, è possibile effettuare il mappaggio uno ad uno di una (N+1)-PDU in una (N)-PDU. Se invece la PDU del livello N+1 è più grande o più piccola dello spazio a disposizione nella PDU del livello N bisognerà rispettivamente segmentare o aggregare.

Nel caso della segmentazione, una (N+1)-PDU viene divisa in più (N)-PDU. Le (N)-PDU sono poi ricombinate e il processo si chiama “ricostruzione”.

Nel caso della aggregazione più (N+1)-PDU vengono trasportate in una unica (N)-PDU. A destinazione le (N+1)-PDU sono quindi estratte dalla (N)-PDU (“disaggregazione”).

## ● Architetture e protocolli di comunicazione

- » Introduzione
- » Funzioni di un processo di comunicazione
- » La stratificazione dell'architettura
- » Flussi di informazioni nel modello a strati
- » Le unità di informazione
- » Primitive di servizio e tipi di servizio

33

## Servizio di strato

- Il servizio fornito da uno strato è logicamente composto da un insieme di elementi
- Ogni elemento di servizio, che corrisponde a un particolare sotto-insieme delle funzioni svolte nello strato in esame, è attuato con interazioni elementari tra “utente” e “fornitore del servizio”
- Tali interazioni elementari tra utente e fornitore del servizio sono le primitive di quell'elemento di servizio

34

Si noti che i termini “utente” e “fornitore del servizio” sono utilizzati con un significato diverso da quello definito nella lezione 4, in cui il “fornitore del servizio” era l’entità “commerciale” che vende (o comunque offre) servizi ai clienti e gli utenti sono le persone che fruiscono di questi servizi.

Qui i termini hanno un significato più “tecnico”: l’utente è una entità in uno strato (N) e il fornitore del servizio è un’altra entità nello strato (N-1) oppure tutto lo strato (N-1) può essere visto come fornitore del servizio delle entità di strato (N).

Attenzione: con il termine (N)-utente si intende un utente dello strato (N), ossia un’entità che usa i servizi dello strato (N) ed è quindi situata nello strato (N+1).

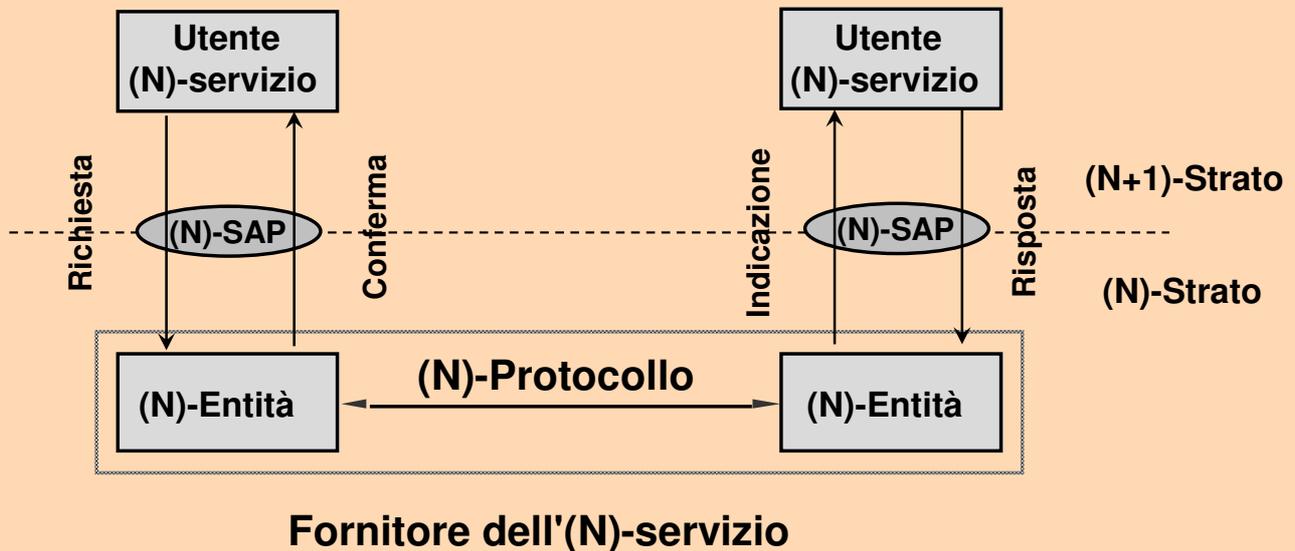
Facendo riferimento alla slide successiva, vediamo che il concetto di “primitiva di servizio” può essere utilizzato per descrivere la comunicazione tra le entità in strati adiacenti all’interno dello stesso sistema, mentre il “protocollo” descrive l’interazione tra entità alla pari (cioè nello stesso strato) ma in sistemi remoti tra loro.

Uno scambio di informazioni tra due strati adiacenti avviene attraverso un N-SAP. Il livello (N+1) invia delle primitive di “*Richiesta*” al livello (N), mentre le primitive di richiesta dal livello (N) al livello (N+1) vengono dette primitive di “*Indicazione*”.

Le risposte del livello (N) al livello (N+1) vengono dette primitive di “*Conferma*”, mentre le risposte del livello (N+1) al livello (N) vengono dette primitive di “*Risposta*”.

## Servizio di strato

Per un elemento dell'(N)-servizio, si definiscono in generale quattro primitive



37

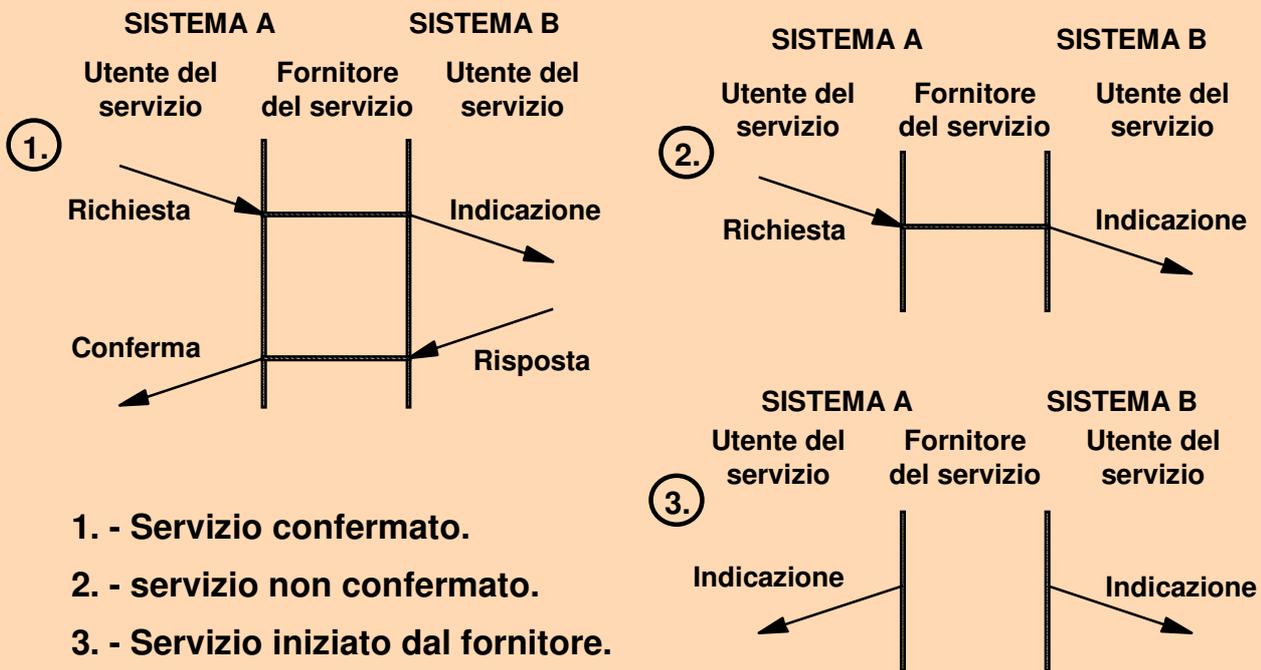
La slide successiva mostra la sequenza temporale con cui le primitive di servizio possono essere scambiate (il tempo scorre dall'alto in basso nei tre diagrammi).

Il cliente del servizio, cioè l'(N)-utente situato nello strato (N+1) nel sistema A richiede un servizio con una primitiva di *Richiesta*. A questa richiesta di servizio corrisponde in genere uno scambio protocollare a seguito del quale nel sistema remoto B una entità di strato (N) invierà una primitiva di *Indicazione* ad una entità di strato (N+1).

In certi casi (schema 1. nella slide), lo strato (N+1) nel sistema B fornisce una *Risposta* allo strato (N), cui corrisponde uno scambio protocollare e quindi lo strato (N) nel sistema A invia allo strato (N+1) una primitiva di *Conferma*.

In altri casi (schema 2. nella slide), non si prevede che lo strato (N+1) nel sistema B fornisca risposta alla primitiva di *Indicazione*, ed analogamente nel sistema A non ci sarà conferma per la primitiva di *Richiesta*.

# Classificazione dei servizi di strato



Le diverse sequenze temporali mostrate nella slide precedente corrispondono in effetti a diversi modi di offrire un elemento di servizio.

Nella modalità confermata si ha una conferma (o risposta) per la richiesta (o indicazione) e questo consente di sapere se la richiesta (indicazione) è andata a buon fine o meno.

Nella modalità non confermata non vi sono conferme (o risposte), quindi il cliente del servizio non viene immediatamente a sapere l'esito della sua richiesta.

## Servizio di strato

Un elemento dell'(N) servizio si dice

- **confermato**: se la sua attuazione richiede l'impiego di tutte le quattro primitive
- **non confermato**: se la sua attuazione richiede le sole primitive di richiesta e di indicazione
- **iniziato dal fornitore**: se è attivato autonomamente dal fornitore, che utilizza solo primitive di indicazione

41

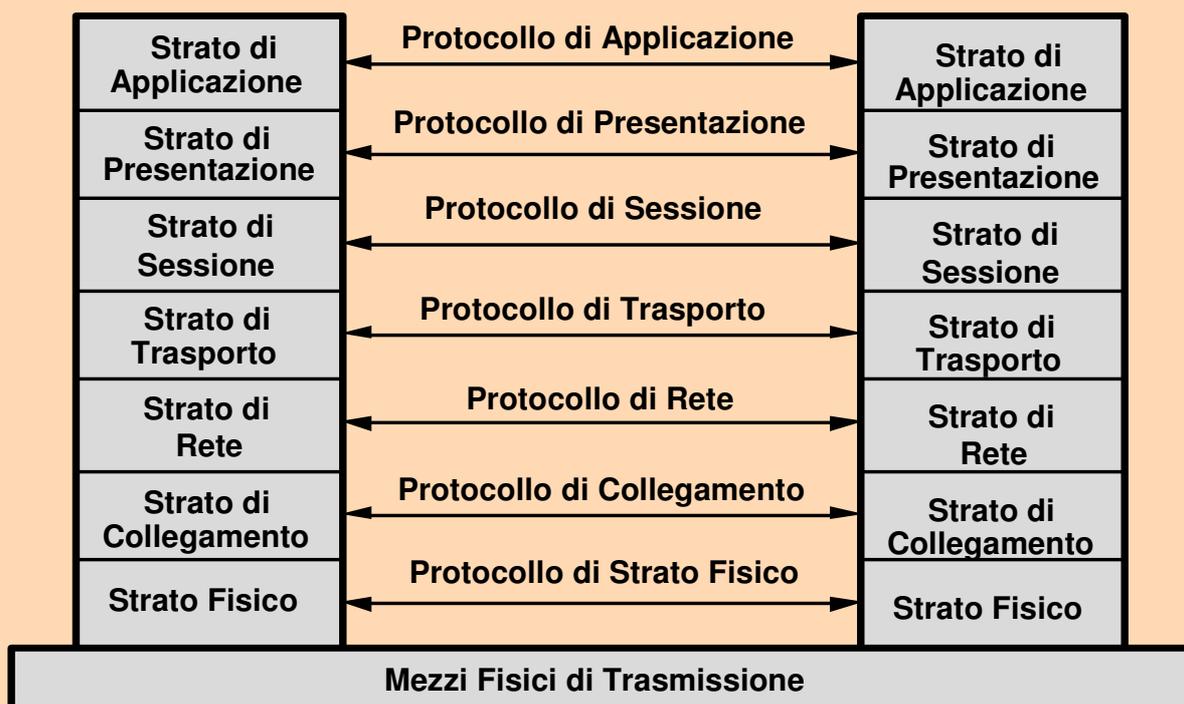
- **Il modello OSI**

42

In questa sezione verranno descritte le caratteristiche del modello “OSI” (Open System Interconnection), la cui architettura è schematizzata nella slide successiva.

Per una introduzione al modello OSI dovete leggervi dal testo “Reti di Telecomunicazioni, Principi Generali” la sezione III.3 pg. 158-161.

## Architettura del modello OSI



## Differenza tra sistemi terminali e di rilegamento



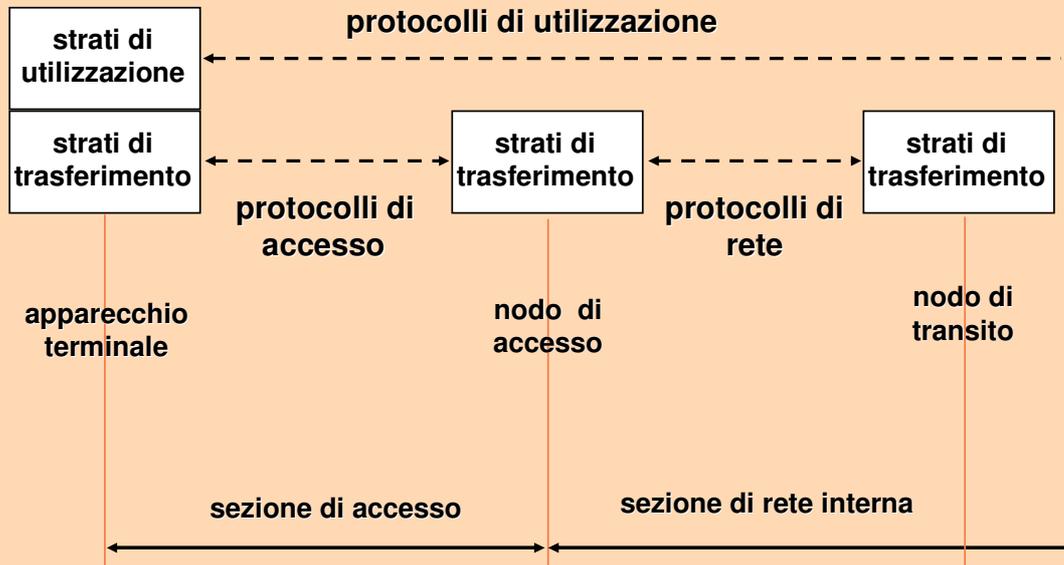
45

Non tutti gli strati sono coinvolti in ogni sistema attraversato. Come si può vedere dalla slide precedente, nei sistemi terminali si realizzano le funzionalità di tutti gli strati. Si dice che i sistemi terminali “terminano” tutti i protocolli dei vari strati.

I terminali comunicano tra loro attraverso i nodi di rete, che svolgono la funzione di “sistemi di rilegamento” utilizzando solo gli strati più bassi dell’architettura. I sistemi di rilegamento quindi “terminano” solo i protocolli di livello basso.

Nella slide successiva si distingue tra strati di utilizzazione e relativi protocolli, che sono terminati nei sistemi terminali, e strati di trasferimento e relativi protocolli, che sono terminati nei sistemi terminali e nei nodi (sia di accesso che di transito) della rete.

# Terminali e nodi di rete



47

## ● Il modello OSI

- » **Livello di Strato Fisico**
- » **Livello di Collegamento**
- » **Livello di Rete**
- » **Livello di Trasporto**
- » **Livello di Sessione**
- » **Livello di Presentazione**
- » **Livello di Applicazione**

48

## Livello 1 - Fisico (PH)

- Fornisce i mezzi meccanici, fisici, funzionali e procedurali per attivare, mantenere e disattivare le connessioni fisiche
- Ha il compito di effettuare il trasferimento delle cifre binarie scambiate dalle entità di livello di collegamento
- Le unità dati sono bit o simboli
- Funzioni principali:
  - » conversioni D/A e A/D
  - » adattamento dei segnali elettrici (o ottici)
  - » trasmissione/ricezione
  - » adattamento meccanico e connettori
  - » specifica dei mezzi trasmissivi

Cfr. “Reti di Telecomunicazioni, Principi Generali”, sezione III.3.9 pg. 170-171.

Lo strato fisico offre alle entità dello strato di collegamento la possibilità di trasferire l'informazione digitale (flussi di bit o di byte) senza preoccuparsi delle modalità con cui avviene questo trasferimento.

Ad esempio due entità di livello dello strato di collegamento possono essere collegate tra loro attraverso un cavo metallico, una fibra ottica o un collegamento radio. Il colloquio tra le entità di collegamento avviene esattamente allo stesso modo, mentre è il livello fisico che si preoccupa di convertire i flussi di bit o byte nei segnali (elettrici, ottici, onde elettromagnetiche...) appropriati.

Una connessione di livello fisico può anche essere realizzata attraverso la concatenazione di più tratte di tipo diverso (es. una fibra ottica, poi un ponte radio, poi un cavo metallico). In questo caso ci sono apparati che operano al livello fisico che operano la conversione dei segnali come necessario, e questo è del tutto invisibile alle entità dello strato di collegamento agli estremi della connessione.

**Il livello fisico può introdurre errori trasmissivi: nel sistema “ricevente” l’entità di strato fisico può offrire all’entità del livello di collegamento una sequenza di bit diversa da quella che l’entità di collegamento aveva affidato all’entità di livello fisico nel sistema “trasmettente”.**

## ● Il modello OSI

- » Livello di Strato Fisico
- » **Livello di Collegamento**
- » Livello di Rete
- » Livello di Trasporto
- » Livello di Sessione
- » Livello di Presentazione
- » Livello di Applicazione

## Livello 2 - Collegamento (Data Link, DL)

- Fornisce i mezzi funzionali e procedurali per il trasferimento delle unità dati tra entità di livello rete e per fronteggiare malfunzionamenti del livello fisico
- Funzioni principali:
  - » delimitazione delle UI
  - » rivelazione e recupero degli errori di trasmissione
  - » controllo di flusso

**Lo strato di collegamento fornisce al livello rete la possibilità di inviare e ricevere unità dati e di fronteggiare malfunzionamenti del livello fisico (in particolare gli errori trasmissivi).**

**La funzionalità di delimitazione delle unità informative serve ad individuare le unità informative all'interno del flusso "indistinto" di bit fornito dal livello fisico.**

# Delimitazione di trama



Livello di collegamento

001011111101011101011110100011011111000100

SAP

Livello fisico

55

# Delimitazione di trama

PDU

001011111101011101011110100011011111000100...

PCI

Dati di utente



Livello di collegamento

001011111101011101011110100011011111000100

SAP

Livello fisico

56

**Discutiamo ora brevemente della funzionalità di rivelazione e recupero degli errori di trasmissione.**

**Il primo passo è ovviamente individuare in ricezione se ci sono stati errori di trasmissione (“rivelazione di errore”). Questo viene fatto aggiungendo dal lato di trasmissione all’informazione utile  $U$  (i “dati di utente”) una informazione di controllo  $C$ , che dipende dall’informazione utile:  $C=f(U)$ .**

**Un esempio di informazione di controllo è il “bit di parità”, che si aggiunge ad una sequenza di bit in modo tale che il numero totale di bit uguali ad “1” sia pari (“parità pari”) o dispari (“parità dispari”). Il ricevitore e il trasmettitore decideranno a priori se utilizzare la “parità pari” o la “parità dispari”.**

**Ad esempio, nel caso si usi la “parità pari” il trasmettitore imposta il bit di parità a “0” se il numero di cifre “1” nella sequenza è pari, ad “1” se il numero di cifre “1” nella sequenza è dispari. Con questa regola si può verificare che il numero totale di bit pari ad “1” trasmessi (nella sequenza e nel bit di parità) sarà sempre pari.**

**In ricezione il ricevitore estrae dall’unità informativa l’informazione utile  $U_r$  e l’informazione di controllo  $C_r$ . Il pedice “r” sta per “ricevuta”. Calcola quindi sulla base dell’informazione utile ricevuta quale sarebbe dovuta essere l’informazione di controllo  $C_c = f(C_r)$ . Il pedice “c” sta per “calcolata”.**

**Il ricevitore rileva gli errori verificando se l’informazione di controllo calcolata è uguale a quella ricevuta  $C_c = C_r$ .**

**Si noti che questa decisione non è corretta al 100%, ad esempio nel caso del bit di parità se si verifica errore su due cifre binarie il ricevitore considera l’informazione ricevuta come corretta.**

Si può definire quindi l'informazione di controllo in modo più sofisticato (cioè utilizzare delle funzioni  $f$  diverse nella relazione  $C=f(U)$ ), per limitare al massimo la probabilità di prendere una decisione non corretta in ricezione. In generale però per limitare la probabilità di prendere una decisione non corretta bisogna aumentare la dimensione dell'informazione di controllo (e quindi utilizzare le risorse di trasferimento in modo meno efficiente).

Un importante esempio di funzioni di rivelazione di errore è quello dei codici a ridondanza ciclica (CRC – Cyclic Redundancy Check). I codici CRC sono delle sequenze di bit di dimensione fissata (es. CRC-4 sono di 4 bit, CRC-16 sono di 16 bit), che possono “controllare” una informazione utile di dimensione arbitraria. La proprietà di questi codici è che garantiscono una decisione corretta in presenza di un numero di errori minore o uguale al numero di bit del codice.

Analizziamo ora come si può comportare una entità nel sistema ricevente quando rileva un errore.

Una prima opzione è semplicemente quella di scartare l'unità informativa errata, senza inoltrarla agli strati superiori. In questo caso lo strato di collegamento non effettua il recupero di errore.

Se invece si vuole che lo strato di collegamento recuperi l'errore, l'entità che ha ricevuto la unità informativa errata deve in qualche modo segnalare alla entità trasmittente il problema per richiedere la ri-trasmissione. Per far questo deve comunicare con l'entità trasmittente nel sistema remoto, realizzando quello che si chiama un protocollo di tipo “ARQ” (Automatic Repeat Request).

Dato che anche il canale di ritorno può essere soggetto ad errori, un protocollo di tipo ARQ deve gestire correttamente varie condizioni di errore, introducendo vari meccanismi (numerazione delle trame, “timeout”, ecc.). Senza entrare nei dettagli, nella slide successiva sono mostrati due tra i meccanismi che possono essere utilizzati nei protocolli ARQ.



Un semplice tipo di “Forward error correction” consiste nel replicare l’informazione un numero dispari di volte. Ad esempio se un singolo bit viene trasmesso tre volte, si è in grado di correggere un errore singolo sui tre bit, poiché viene presa in ricezione una decisione “a maggioranza”.

informazione da trasmettere	informazione trasmessa	informazione ricevuta	informazione mandata allo strato superiore
1	111	111	1
1	111	101	1 (un errore corretto)
1	111	001	0 (due errori non corretti)

I codici a correzione di errore operano in modo molto più sofisticato ed efficiente rispetto alla replica dell’informazione, in ogni caso essi introducono una ridondanza cioè una quantità di informazione aggiuntiva molto superiore a quella dei codici a rivelazione di errore e questo è il loro principale svantaggio.

I vantaggi sono quello già citato di non introdurre i ritardi dovuti ai protocolli di tipo ARQ e anche quello di poter operare quando non vi è un canale di ritorno tra il ricevitore e il trasmettitore. Ad esempio sono utilizzati nelle trasmissioni broadcast digitali via satellite.