



Elementi di reti di telecomunicazione

Massimiliano Comisso, Fulvio Babich

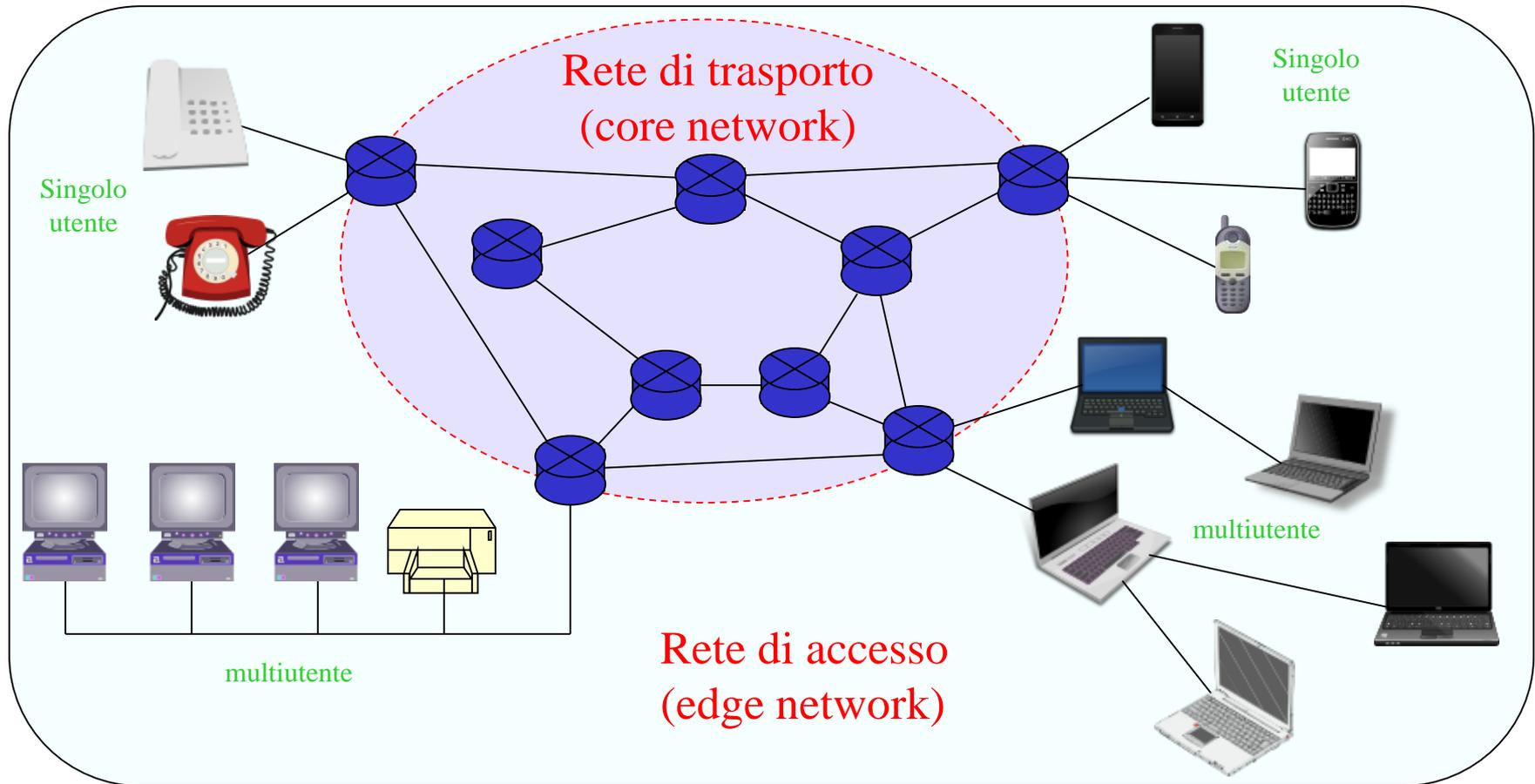
Dipartimento di Ingegneria e Architettura
Università degli Studi di Trieste



Rete di telecomunicazioni

- **Obiettivo:** trasferire informazione da una sorgente ad un destinatario, rispettando una qualità di servizio (Quality of Service – **QoS**) prefissata.
- **Risorse:**
 - **Nodi:** **elaboratori** intermedi fra la sorgente e il destinatario. Possono anche essere gli elementi di **accesso** alla rete.
 - **Collegamenti:** **canali** fisici o logici attraverso cui viene inviata l'informazione. Tipologie:
 - **simplex:** l'invio dell'informazione avviene in una sola direzione,
 - **half-duplex:** l'invio dell'informazione avviene in entrambe le direzioni, ma non simultaneamente (la direzione di trasferimento viene invertita ciclicamente),
 - **full-duplex:** l'invio dell'informazione avviene simultaneamente nei due sensi.

Edge e core network



- **Core Network:** insieme di nodi e collegamenti.
- **Edge network:** modalità con cui gli utenti accedono alla core network.



Edge network: Classificazione (I)

- SINGOLO UTENTE (ultimo miglio)
 - Cavo
 - Rame
 - Telefonia
 - Dati con modem in banda fonica
 - Dati ad alta velocità (ADSL)
 - Fibra ottica
 - Radio
 - Cellulare
 - 1G (Total Access Communications System – TACS)
 - 2G (Global System for Mobile communications – GSM)
 - 3G (Universal Mobile Telecommunications System – UMTS)
 - 4G (Long Term Evolution – LTE)



Edge network: Classificazione (II)

- MULTIUTENTE

- Cavo

- Centralino (call center)
 - LAN
 - Ethernet (IEEE 802.3)

- Radio

- Wireless PAN (WPAN)
 - Bluetooth (IEEE 802.15.1)
 - ZigBee (include l'IEEE 802.15.4)
 - Wireless LAN (WLAN)
 - WiFi (IEEE 802.11)
 - Wireless MAN (WMAN)
 - Worldwide interoperability for Microwave Access - WiMAX (IEEE 802.16)



Definizioni

- **Servizio**: **funzionalità offerta** da un ente (livello, utente, ...) ad un altro (**motivazione** della comunicazione).
- **Protocollo**: **insieme di regole** che disciplina lo scambio di informazioni fra due enti di un sistema di comunicazione (**modalità** della comunicazione). Specifica:
 - la sequenza delle operazioni da effettuare,
 - il formato dei dati scambiati,
 - la gestione delle eccezioni.
- Lo scambio delle informazioni deve rispettare la qualità del servizio (*Quality of Service*, **QoS**). Diversi requisiti di **QoS** implicano **diversi protocolli**.



Qualità del servizio: Parametri

- **Probabilità di blocco:** indisponibilità delle risorse in fase di assegnazione.
- **Probabilità di errore:** dovuta ad errori sui bit a causa di disturbi (rumore, interferenza, affievolimento, ...).
- **Velocità di trasmissione:** tasso di invio dei bit (bit rate).
- **Ritardo:** determinato da quattro componenti principali: ritardo di coda, ritardo di elaborazione, tempo di trasmissione, ritardo di propagazione.
- **Probabilità di perdita:** indisponibilità delle risorse precedentemente assegnate (dovuta ad esempio a congestione della rete).



Gestione delle risorse

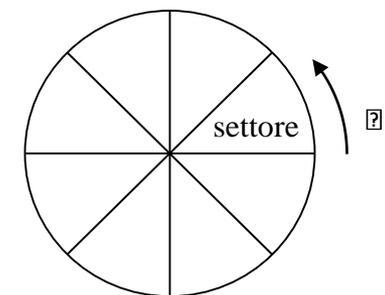
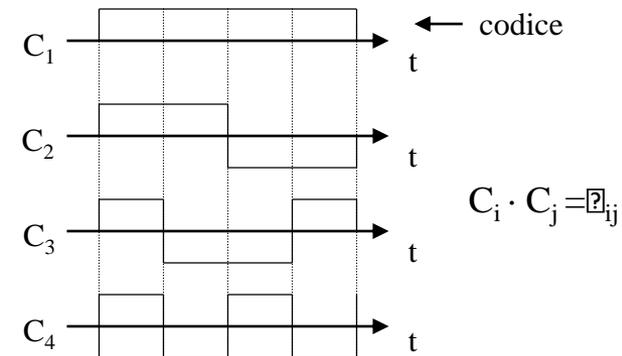
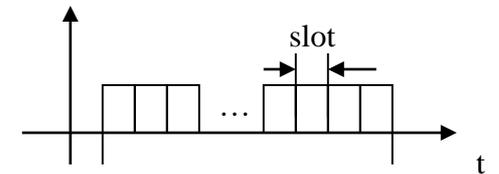
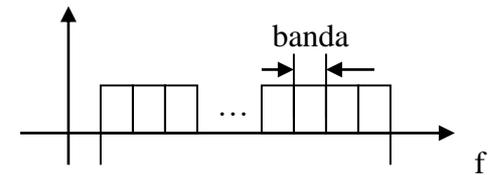
Domini di un mezzo trasmissivo: **frequenza, tempo, spazio**.

Tali domini possono essere condivisi secondo due modalità.

- **Multiplazione**: coesistenza di diversi flussi informativi (inviati da un singolo utente) su uno stesso dominio.
 - **Coordinata a priori**: **multiplazione deterministica**.
 - **Non coordinata a priori**: **multiplazione statistica**.
- **Accesso multiplo**: coesistenza di diversi utenti su una su uno stesso dominio. Uno schema di accesso multiplo deriva da uno schema di multiplazione (deterministica o statistica).

Multiplazione/Accesso multiplo

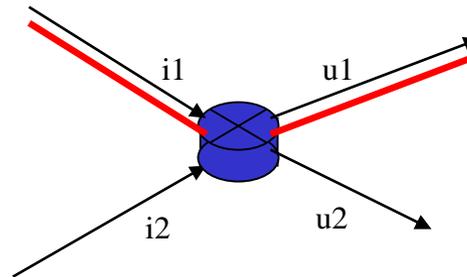
- Frequency Division Multiplexing (**FDM**) / Frequency Division Multiple Access (**FDMA**): flussi/utenti distinti in base a bande diverse. FDMA usato nel TACS.
- Time Division Multiplexing (**TDM**) / Time Division Multiple Access (**TDMA**): flussi/utenti distinti in base a slot diversi. TDMA usato nel GSM.
- Code Division Multiplexing (**CDM**) / Code Division Multiple Access (**CDMA**): flussi/utenti distinti in base a codici (sequenze) diversi. CDMA usato nell'UMTS.
- Space Division Multiplexing (**SDM**) / Space Division Multiple Access (**SDMA**): flussi/utenti distinti in base a settori diversi. SDMA usato nel Gigabit-WiFi.



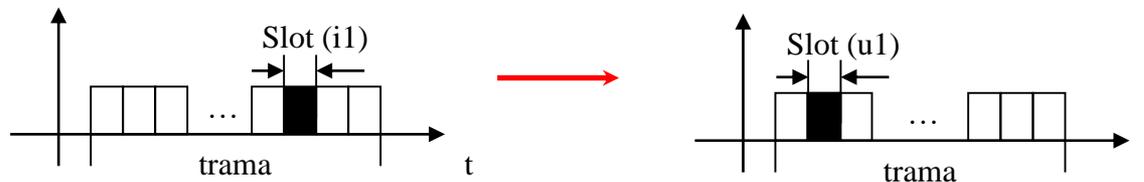
Trasferimento dell'informazione

Operazioni svolte da un nodo

- **INSTRADAMENTO**: scelta del percorso, $i1 \rightarrow u1$.



- **COMMUTAZIONE**: scelta della risorsa sui singoli collegamenti, $\text{slot}(i1) \rightarrow \text{slot}(u1)$.





Commutazione di circuito

Se la corrispondenza tra risorse in ingresso e risorse in uscita è rigida (associazioni $i1 \rightarrow u1$ e $\text{slot}(i1) \rightarrow \text{slot}(u1)$ fisse per tutta la durata del trasferimento) la modalità di trasferimento dell'informazione è a **commutazione di circuito**.

- Risorsa garantita per l'intera durata del trasferimento (multiplicazione deterministica).
- Ritardo limitato.
- Pochi bit di indirizzamento (basso overhead).
- Percorso scelto a priori, prima dello scambio di informazione (consegna ordinata).
- Tariffa a tempo.



Commutazione di pacchetto

Se la corrispondenza tra risorse in ingresso e risorse in uscita non è rigida la modalità di trasferimento dell'informazione è a **commutazione di pacchetto**.

- Risorsa non riservata, ma allocata durante il trasferimento (moltiplicazione statistica).
- Ritardo non limitato.
- Due modalità:
 - **circuito virtuale** (associazione $i1 \rightarrow u1$ fissa, associazione $\text{slot}(i1) \rightarrow \text{slot}(u1)$ non fissa).
 - Più bit di indirizzamento rispetto alla commutazione di circuito.
 - Percorso scelto a priori, prima dello scambio di informazione (consegna ordinata).
 - Tariffa a traffico.
 - **datagram** (associazioni $i1 \rightarrow u1$ e $\text{slot}(i1) \rightarrow \text{slot}(u1)$ ambedue non fisse).
 - Elevato overhead (necessario l'indirizzo completo).
 - Ciascun pacchetto viene instradato individualmente (consegna non ordinata).
 - Tariffa forfettaria.



Indirizzi

- **Commutazione di circuito:** pochi bit di indirizzamento. L'indirizzo completo è utilizzato solo in fase di apertura della connessione, dato che tutte le associazioni sono rigide. Es.: numero telefonico ha tutto ciò che serve per individuare sorgente e destinatario, una volta individuati, la risorsa è a disposizione e si usa un header di 1 solo byte.
- **Commutazione di pacchetto (circuito virtuale):** moderato numero di bit di indirizzamento. L'indirizzo completo è utilizzato solo in fase di apertura della connessione, ogni colloquio è associato ad un numero di circuito virtuale che consente ai nodi di individuare il percorso (fisso) da seguire, ma permette di cambiare lo slot (maggiore elasticità, posso cambiare collegamento). Tale numero di circuito virtuale va inserito nei pacchetti (un po' meno efficiente di prima, maggior overhead). Es.: header Asynchronous Transfer Mode (ATM): 5 byte.
- **Commutazione di pacchetto (datagram):** molti bit di indirizzamento. L'indirizzo completo (sorgente e destinatario) va inserito in ogni pacchetto, maggiore quantità di bit da riservare. Es.: header Internet Protocol (IPv4): 20 byte.



Riepilogo

Modalità	Prenotazione risorse	Ritardo	Overhead	Percorso	Tariffa	Arrivo in ordine
commutazione di circuito	si	limitato	basso	a priori	a tempo	si
commutazione di pacchetto (circuito virtuale)	no	non limitato	moderato	a priori	a traffico	si
commutazione di pacchetto (datagram)	no	non limitato	elevato	durante il trasferimento	forfettaria	no



Architettura di comunicazione a livelli

Una rete di telecomunicazioni è un sistema complesso in cui si presentano una molteplicità di problemi:

7. Tipologia di servizio da soddisfare
6. Formato di rappresentazione dell'informazione
5. Modalità di attivazione della connessione
4. Qualità richiesta dall'utente
3. Percorso per raggiungere il destinatario
2. Gestione delle risorse condivise
1. Scelta dei parametri fisici di trasmissione

Elaborazione
dell'informazione

Trasferimento
dell'informazione



Modello di riferimento ISO/OSI (I)

Soluzione: **suddividere** il problema complessivo in problemi elementari.



Modello Open Systems Interconnection (OSI),
stabilito dall'ISO che definisce 7 livelli.

- **Vantaggi**
 - Sviluppo più semplice
 - Aggiornamento e manutenzione più agevoli
- **Svantaggi**
 - Soluzione sub-ottima (i 7 problemi sono solo parzialmente indipendenti)
 - Software più voluminoso

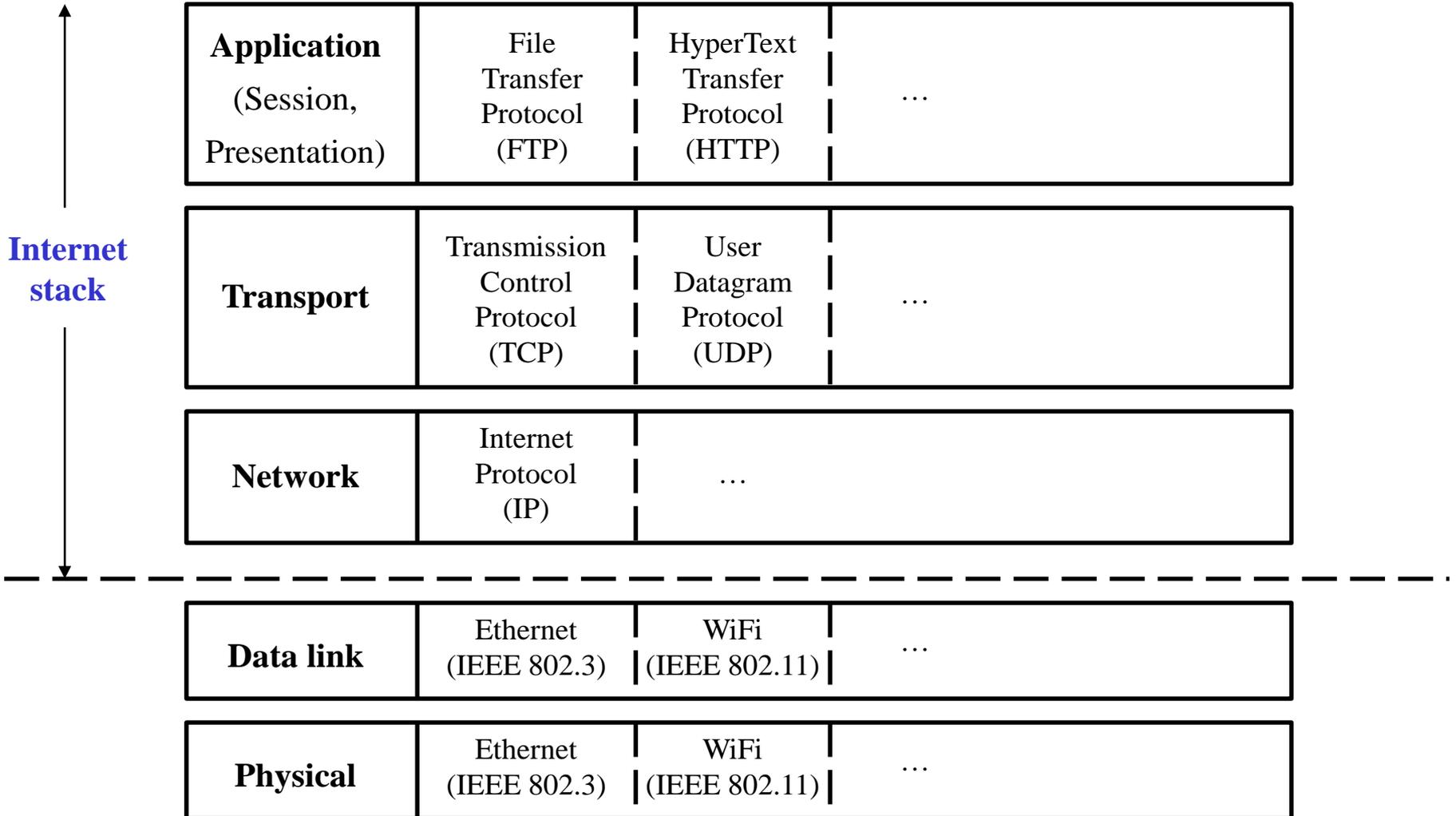
Modello di riferimento ISO/OSI (II)



Livello	Funzione principale	Note
<i>7. Application</i> Applicazione	Specifica i servizi a disposizione dell'utente.	Può talvolta effettuare l'operazione di controllo del flusso (al fine di evitare la congestione).
<i>6. Presentation</i> Presentazione	Specifica il formato dell'informazione da scambiare.	Nello stack Internet è incapsulato nel livello applicazione.
<i>5. Session</i> Sessione	Regola l'apertura, il ripristino, e la chiusura di una sessione.	Nello stack Internet è incapsulato nel livello applicazione.
<i>4. Transport</i> Trasporto	Negozia la QoS con l'utente.	Verifica che la rete sia in grado di soddisfare la qualità concordata, e può talvolta effettuare le operazioni di controllo dell'errore e del flusso (al fine di evitare la congestione).
<i>3. Network</i> Rete	Gestisce il percorso tra sorgente e destinatario.	Si occupa di instradare l'informazione attraverso i nodi intermedi.
<i>2. Data Link</i> Collegamento	Gestisce l'accesso al mezzo ed effettua le operazioni di controllo dell'errore e del flusso.	Si occupa del trasferimento dell'informazione sulla singola tratta. Usualmente diviso in Logical Link Control (LLC) e Medium Access Control (MAC).
<i>1. Physical</i> Fisico	Gestisce la trasmissione sul canale.	Stabilisce i parametri trasmissivi (modulazione, tasso di trasmissione, livello di potenza, ...).



Esempio di protocol stack: Internet





LIVELLO DI COLLEGAMENTO (DATA LINK LAYER - DLL)

DLL – Compiti

1. **Framing**: suddivisione del flusso di bit provenienti dal livello rete in pacchetti adatti alla trasmissione a livello fisico.
2. **Controllo d'errore**: gestione degli errori dovuti ai disturbi e delle eventuali ritrasmissioni (**Automatic Repeat Request, ARQ**)
3. **Accesso multiplo**: gestione dell'accesso al mezzo trasmissivo da parte delle sorgenti.
4. **Controllo del flusso**: meccanismo che limita il tasso di emissione delle sorgenti.

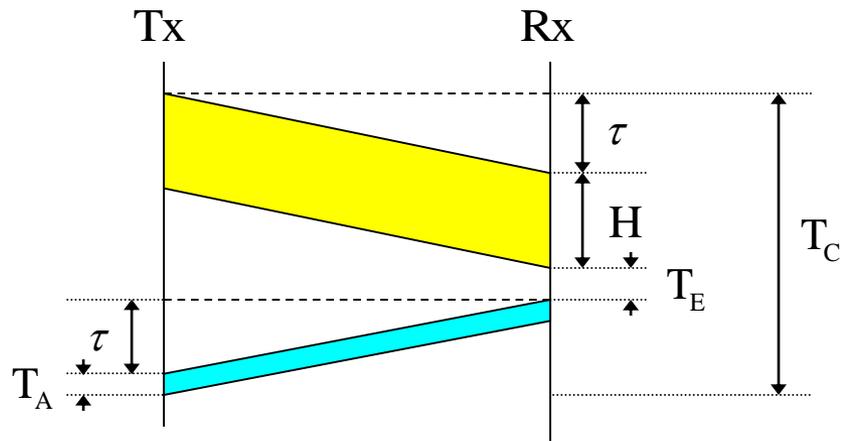
Compiti specifici del DLL
(solo lui se ne occupa).

Compiti solitamente eseguiti
dal DLL, ma che in alcuni
casi possono essere eseguiti
anche da altri livelli.

ARQ - Definizioni

Presupposti:

- Rivelazione d'errore (error detection).
- Comunicazione bidirezionale: disponibilità di un canale di ritorno (feedback) su cui è possibile inviare i pacchetti di ACKnowledgement (ACK).
- Tolleranza del servizio al ritardo.



τ : ritardo di propagazione

2τ : round trip delay (ritardo di andata e ritorno)

H : tempo di trasmissione del pacchetto dati

T_E : tempo di elaborazione (error detection)

T_A : tempo di trasmissione del pacchetto di ACK

T_C : tempo di ciclo

$$T_C = 2\tau + H + T_E + T_A$$



$$T_C \cong 2\tau + H$$

$$T_E, T_A \ll \tau, H$$

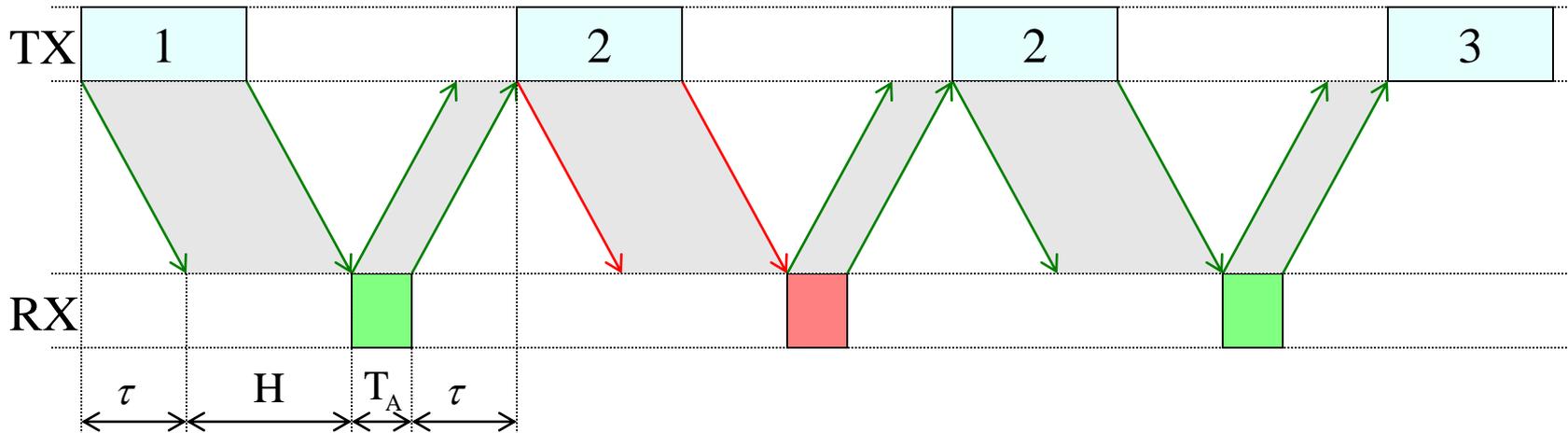


ARQ – Modalità

Le modalità si distinguono in base al **comportamento del trasmettitore** dopo aver trasmesso il pacchetto.

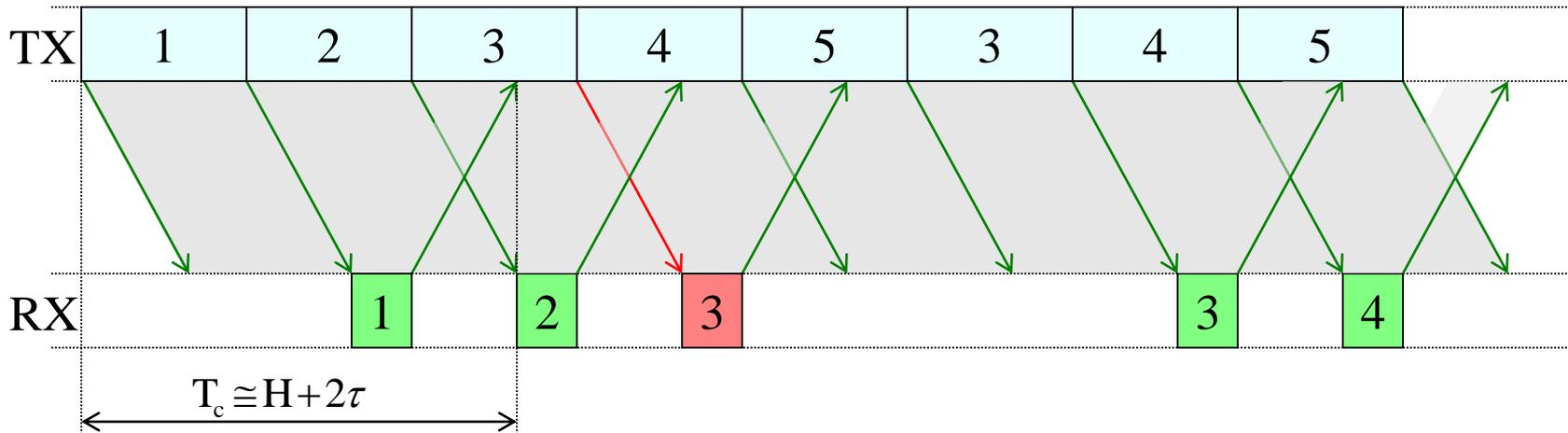
1. **Stop and Wait**: viene trasmesso **un pacchetto alla volta**. Il trasmettitore invia un pacchetto ed aspetta l'ACK. Se l'ACK non arriva entro un timeout 2τ , si ritrasmette il pacchetto, altrimenti viene inviato il pacchetto successivo.
2. **Go-back-N**: vengono trasmessi **pacchetti fino ad un massimo di N**. Arrivato ad N, il trasmettitore si ferma ed aspetta l'ACK del pacchetto più vecchio. Se l'ACK non arriva entro il timeout, vengono **ritrasmessi tutti gli N pacchetti**. Se l'ACK del pacchetto più vecchio arriva entro il timeout, vengono trasmessi nuovi pacchetti fino ad un massimo di N.
3. **Selective Repeat**: vengono trasmessi **pacchetti fino ad un massimo di N**, ma in caso di **errore** vengono ritrasmessi **solo i pacchetti errati**.

ARQ – Stop and Wait



- Il trasmettitore conserva in memoria il messaggio, sino ad avvenuta trasmissione corretta.
- In caso di mancata conferma, scatta un meccanismo di **timeout**.
- Vantaggi:
 - Non è richiesto alcun buffer al ricevitore, né al trasmettitore.
 - Non ci sono ripetizioni inutili.
 - I pacchetti sono inviati uno alla volta, non serve la numerazione dei pacchetti.
 - I pacchetti vengono consegnati già in ordine, non c'è bisogno di riordino.
- Svantaggio:
 - Il trasmettitore perde parte del tempo a disposizione in attesa dell'ACK.

ARQ – Go-back-N (I)

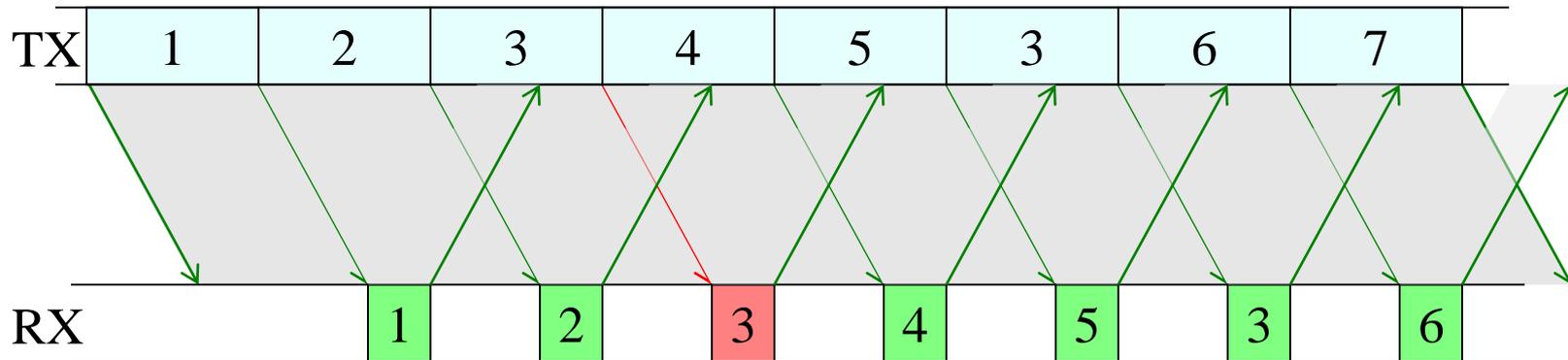


- Obiettivo: migliorare Stop and Wait (tenere il canale occupato) continuando ad inviare pacchetti senza aspettare l'arrivo dell'ACK. Quando questo arriva il trasmettitore sta ancora trasmettendo e continua fino ad un massimo di N pacchetti. Se l'ACK per il primo pacchetto non è ancora arrivato, il trasmettitore si ferma conservando in memoria gli N pacchetti trasmessi (sino ad avvenuta trasmissione corretta). N va scelto in modo da non lasciare tempi morti all'interno del tempo di ciclo:

$$N \cdot H \geq H + 2\tau \Rightarrow N \geq \frac{H + 2\tau}{H} = 1 + 2a \Rightarrow N = \lceil 1 + 2a \rceil$$

dove $a = \tau/H$ è il ritardo di propagazione normalizzato al tempo di trasmissione.

ARQ – Selective Repeat



- Le ritrasmissioni coinvolgono solo i pacchetti errati.
- Vantaggi:
 - Non ci sono ripetizioni inutili (ottimale utilizzo del tempo).
- Svantaggi:
 - In questo caso, un buffer in grado di memorizzare N messaggi, è necessario anche al ricevitore, oltre che al trasmettitore.
 - Serve la numerazione dei pacchetti.
 - I pacchetti non vengono consegnati in ordine (richiesto il riordino dei pacchetti da parte del ricevitore).



ARQ – Riepilogo

S_{\max} (≤ 1) è sempre proporzionale a P_c in tutti e tre i casi.

MODALITA'	E [tempo totale]	S_{\max}	Caratteristiche	Utilizzo
Stop and Wait	$\frac{T_c}{P_c}$	$\frac{P_c}{1+2a}$	S_{\max} diminuisce sensibilmente all'aumentare di τ .	Si usa se e solo se $a \ll 1$ ($\tau \ll E[H]$). Reti di piccole dimensioni: PAN, LAN, WPAN, WLAN, ...
Go-back-N	$\frac{H+2\tau P_E}{P_c}$	$\frac{P_c}{1+2aP_E}$	S_{\max} diminuisce sensibilmente all'aumentare di τ se P_E è significativo.	Si usa se $a \ll 1$ ($\tau \ll E[H]$) e $P_E \ll 1$. Reti di grandi dimensioni ed a basso tasso di errore: MAN, WAN, ...
Selective Repeat	$\frac{H}{P_c}$	P_c	S_{\max} è indipendente da τ .	Si usa se $a \ll 1$ ($\tau \ll E[H]$) e $P_E \ll 1$. Reti di grandi dimensioni e ad alto tasso di errore: reti cellulari (GSM/UMTS/LTE).

Hybrid ARQ

- La tecnica di ripetizione opera in sinergia con la codifica di canale.
 - *Repetition Hybrid ARQ with soft (Chase) combining*: i valori soft delle repliche ricevute vengono memorizzati e combinati per incrementare la probabilità di corretta decodifica.

Prima trasmissione	Informazione	Ridondanza
Ripetizione	Informazione	Ridondanza

- *Incremental Hybrid ARQ*: le ripetizioni includono solo ridondanza supplementare.

Prima trasmissione	Informazione	Ridondanza 1
Ripetizione		Ridondanza 2

- *Complementary Hybrid ARQ*: le repliche includono l'informazione (codifica sistemica) e ridondanza supplementare

Prima trasmissione	Informazione	Ridondanza 1
Ripetizione	Informazione	Ridondanza 2



Accesso multiplo

Nella pratica si adottano schemi basati sul TDMA (derivati dal TDM).

- Centralizzato
 - **Polling**: un nodo (master) chiede agli altri (slave) uno alla volta se hanno qualcosa da trasmettere, circolarmente (round robin). Multiploazione deterministica.
- Distribuito
 - **Coordinato**: ci si scambia il diritto a parlare. Adatto per alti carichi di traffico. Multiploazione deterministica.
 - **Casuale** (random): ognuno trasmette eseguendo individualmente un algoritmo con all'interno un parametro aleatorio. Ci può essere il fenomeno della **collisione** (due o più stazioni trasmettono contemporaneamente) con la perdita dei pacchetti coinvolti. Adatto per bassi carichi di traffico. Multiploazione statistica.
 - **Ibrido**: accesso casuale (multiploazione statistica) per basso carico e coordinato (multiploazione deterministica) per alto carico.

Storicamente sono nate prima le tecniche basate sul polling, ma sono state usate poco. Successivamente sono nate le tecniche distribuite-coordinate (più affidabili). **Oggi** si usano quasi esclusivamente le tecniche **distribuite-casuali** (più **flessibili** alle condizioni del traffico).



Accesso casuale

Completamente distribuito e quindi **soggetto a collisioni** (le trasmissioni simultanee sono distruttive, portano alla perdita di parte dei pacchetti coinvolti – alcuni potrebbero essere catturati dai ricevitori - e richiedono ritrasmissioni). L'accesso casuale richiede in genere conferma mediante ACK. Gli algoritmi si distinguono in base a come prevengono e risolvono le collisioni.

- **ALOHA**: la più semplice e la prima soluzione ad essere stata sviluppata. Nata negli anni '70 all'Università delle Hawaii per mettere in comunicazione le stazioni distribuite sulle varie isole. Non prevede alcun monitoraggio del mezzo prima della trasmissione. Usato nel GSM, nell'UMTS e nell'LTE per il RACH.
- Carrier Sensing Multiple Access (**CSMA**): tipologia di algoritmi che prevede il monitoraggio del canale in modo da sentire se qualcuno sta trasmettendo. Usato in Ethernet e nel WiFi.



Aloha (I)

- Quando una stazione ha un pacchetto pronto lo trasmette immediatamente.
- In caso di collisione (mancata ricezione dell'ACK da parte del ricevitore), si attende un certo tempo scelto in modo casuale (**backoff**) e si ripete il tentativo.
- Ipotesi:
 - arrivo di Poisson (sia per il traffico nuovo che per le ritrasmissioni)
 - pacchetti di lunghezza costante

- Definizioni:

H [s]: tempo di trasmissione del pacchetto (costante)

λ [p/s]: tasso di arrivo (traffico nuovo + ritrasmissioni)

$\mu = 1/H$ [p/s]: tasso di servizio

$G = \frac{\lambda}{\mu} = \lambda \cdot H$: carico complessivo (traffico nuovo + ritrasmissioni)

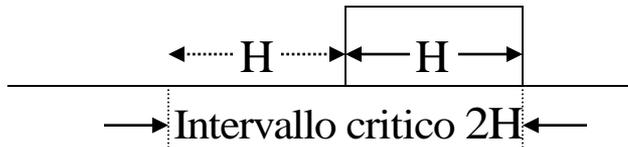
P_s : probabilità di successo (probabilità che non ci sia collisione)



$$S = G \cdot P_s: \text{throughput}$$



Aloha (II)



$P_s = \Pr\{\text{assenza di trasmissioni sovrapposte, anche parzialmente}\}$

$$= \Pr\{\text{nessuna trasmissione in } 2H\} = e^{-\lambda \cdot 2H} = e^{-2G}$$

Poisson ($n=0$)



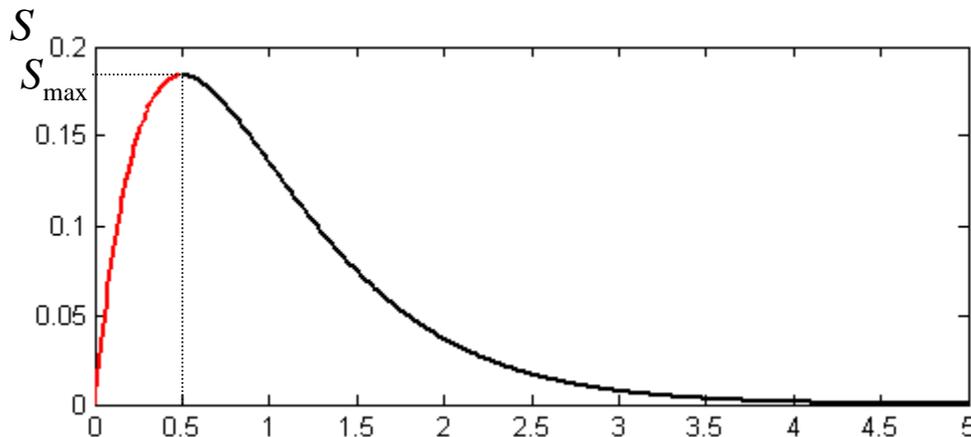
$$S = G \cdot P_s = G \cdot e^{-2G}$$

— $G \ll 1 \Rightarrow S \cong G$

Se il carico complessivo è basso, viene tutto smaltito (le collisioni non si verificano).

$$\frac{dS}{dG} = e^{-2G}(1-2G) = 0 \Rightarrow G = \frac{1}{2} \Rightarrow S_{\max} = \frac{1}{2e} \cong 0.18$$

Se il carico complessivo è alto, al massimo il 18% viene smaltito.



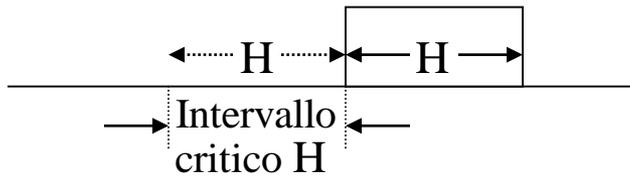
— Zona in cui può trovarsi il punto di lavoro.

— Zona in cui non può trovarsi il punto di lavoro (all'aumento del traffico in ingresso corrisponde una diminuzione del traffico smaltito). Se occasionalmente si supera S_{\max} , il sistema collassa (è instabile).

G



Slotted Aloha



Variante: il tempo è diviso in slot e la trasmissione non può iniziare in qualunque momento, ma solo negli istanti corrispondenti all'inizio di uno slot.

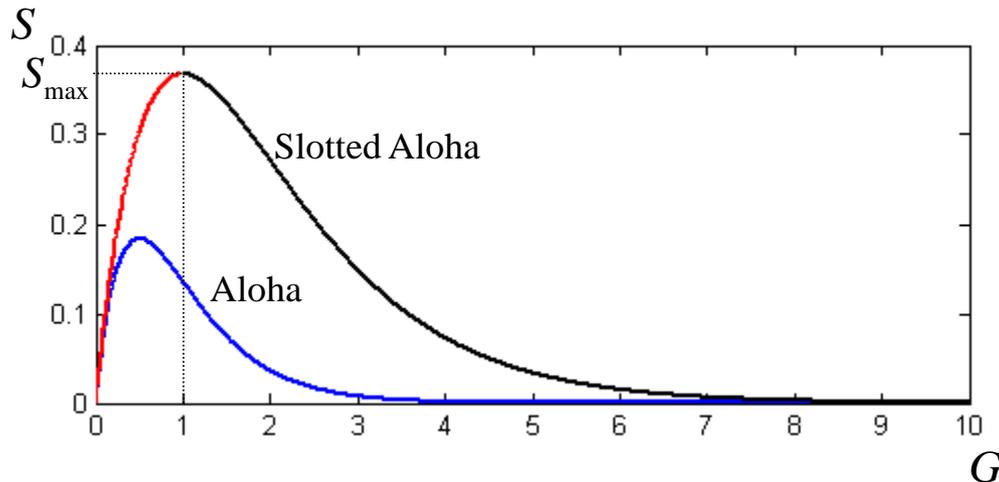
$$P_s = \Pr \{ \text{nessuna trasmissione in H} \} = e^{-\lambda \cdot H} = e^{-G}$$



$$S = G \cdot P_s = G \cdot e^{-G}$$

$$- \frac{dS}{dG} = e^{-G}(1-G) = 0 \Rightarrow G=1 \Rightarrow S_{\max} = 1/e \cong 0.36$$

Ora, se il carico complessivo è alto, al massimo il 36% viene smaltito.



Molto utilizzato (GSM, UMTS, LTE) anche se 36% è molto minore del 100%.

Lo slotted Aloha funziona con qualunque valore di $a = \tau / E[H]$. Rimane il sistema migliore nel caso in cui $\tau \ll E[H]$, in quanto le tecniche basate sul CS vanno in crisi.

Il problema dell'instabilità rimane.



CSMA

- Tecniche di accesso casuale basate sul Carrier Sensing (CS), cioè sul **rilevamento** (sensing) **della frequenza portante** (carrier). In questo modo la stazione verifica se il canale è libero prima di iniziare la trasmissione.
- Per funzionare opportunamente i sistemi CSMA richiedono:
 - $\tau \ll E[H]$, altrimenti il CS non è affidabile (da informazioni ‘vecchie’),
 - **collegamento broadcast**, ogni nodo deve poter sentire tutti gli altri. Non ci devono essere terminali nascosti (**hidden terminal**) che non sono sentiti.
- I sistemi CSMA possono essere:
 - **unslotted**: la trasmissione può partire in qualunque istante.
 - **slotted**: la trasmissione può partire soltanto all’inizio di uno slot. La durata dello slot nel CSMA è un sottomultiplo del tempo di trasmissione H ed è in genere pari al ritardo di propagazione τ , quindi è molto minore della durata di uno slot nell’Aloha ($H+2\tau$).
- Estensioni:
 - Collision Detection (CD): **monitoraggio**, da parte del trasmettitore, **della sua stessa trasmissione**, in modo da verificare se ciò che sta viaggiando sul mezzo è uguale a ciò che il trasmettitore ha inviato (detta anche Listen While Talk). Utilizzata nei casi in cui il mezzo trasmissivo è un cavo (Ethernet).
 - Collision Avoidance (CA): sequenza di **operazioni atte a prevenire** il più possibile **la collisione** in mezzi in cui non è possibile eseguire fisicamente la CD. Utilizzata nei casi in cui il mezzo trasmissivo è wireless (WiFi).



Arrivo senza memoria

Poisson: Probabilità che si verifichino n arrivi in un intervallo di tempo T (ad esempio che vengano trasmessi n pacchetti), quando il verificarsi di un evento è la risultante di infinite cause tra di loro indipendenti (ad esempio traffico prodotto da sorgenti indipendenti). L'intervallo tra due eventi è distribuito in maniera esponenziale, con valor medio $1/\lambda$.

$$P_X(k) = \begin{cases} e^{-\lambda T} (\lambda T)^k / k! & k = 0, 1, 2, \dots \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad \lambda \text{ è il tasso di arrivo}$$

$$\Phi_X(s) = e^{\lambda T(e^s - 1)}$$

$$E[X] = \sigma_X^2 = \lambda T$$

Il tempo di interarrivo è distribuito con legge esponenziale.

$$f_T(t) = \lambda \exp(-\lambda t) U(t)$$

$$\Phi_T(s) = \frac{1}{1 - s/\lambda}$$

$$\sigma_T^2 = (E[t])^2 = 1/\lambda^2$$

$$F_T(t) = [1 - \exp(-\lambda t)] U(t)$$