

# **Reti di Calcolatori**

Appunti delle Lezioni di Reti di Calcolatori

*Anno Accademico: 2024/25*

*Giacomo Sturm*

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Informatica e delle Tecnologie Aeronautiche  
Università degli Studi “Roma Tre”*

Sorgente del file LaTeX disponibile al seguente link:

<https://github.com/00Darxk/Reti-di-Calcolatori/>

## Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
1.1	Commutazione . . . . .	1
1.2	Velocità . . . . .	2
1.3	Gestione delle Risorse . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Modello ISO-OSI</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Standard IEEE 802</b>	<b>5</b>
3.1	802.11: WiFi . . . . .	5
3.2	802.3: Ethernet . . . . .	5
3.3	802.1D: Bridge-Switch . . . . .	5

## 1 Introduzione

Una qualsiasi interconnessione di calcolatori può rappresentare una rete di calcolatori, ma in base alla distanza reciproca tra questi componenti si tratta di reti differenti. Convenzionalmente si considerano reti di calcolatori, sistemi di calcolatori interconnessi ad una distanza superiore ai 50 cm. Una distanza minore, fino ai 5 cm, generalmente interessa componenti dello stesso computer, sulla stessa scheda madre, connesse tra di loro; mentre una distanza inferiore ai 5 cm rappresenta componenti sullo stesso chip. Inoltre le reti considerate possono essere ulteriormente divise in base alla distanza dei loro elementi:

- Se hanno una distanza minore di 5 km, si tratta di risorse connesse sulla stessa rete o edificio, o su edifici vicini. Questo tipo di rete si chiama Local Area Network (LAN);
- Se hanno una distanza superiore ai 5 km, si tratta di risorse connesse su una vasta area geografica. Questo tipo di rete si chiama Wide Area Network (WAN).

Tra questi due livelli possono essere presenti anche tecnologie molto diverse tra di loro, queste tecnologie vengono identificate da acronimi da cui è possibile ricavare lo scopo della tecnologia, senza tuttavia conoscere il suo funzionamento.

Una connessione tra componenti di una rete coinvolge sempre uno scambio di informazioni, tramite uno scambio di messaggi in serie. Gli elementi della rete effettuano degli accessi ad essa apparentemente in parallelo e simultanei, per poter comunicare tra di loro. Mentre su componenti sulla stessa macchina o sullo stesso chip avvengono tramite accessi ad una memoria condivisa.

Le connessioni tra componenti di una rete avvengono su uno strato fisico, quindi attraverso diversi mezzi trasmissivi, i quali non verranno analizzati approfonditamente a questo livello di astrazione. Tra i più comuni mezzi trasmissivi abbiamo cavi in fibra ottica, o in rame, ed onde radio.

### 1.1 Commutazione

Una rete di calcolatori può essere rappresentata come un grafo composto da vari nodi, per realizzare tutte le possibili coppie di calcolatori che potrebbero comunicare tra di loro attraverso la rete. Ma se venissero collegati individualmente tutte le possibili coppie di calcolatori necessiterebbe di infrastrutture massicce, poiché il numero dei possibili percorsi aumenta quadraticamente rispetto all'aumento dei calcolatori della rete. Infatti avendo  $n$ , tutte le possibili combinazioni tra questi calcolatori sono  $n(n-1)/2$ , nel caso ognuna di queste coppie corrisponda ad una connessione differente, il costo di costruzione e gestione della rete sarebbe eccessivo.

Per risolvere questo problema e diminuire il numero totale di connessioni nella rete si utilizza il meccanismo della commutazione. Questo termine risale alla telefonia, dove ai sorse lo stesso problema, risolto introducendo centralini intermedi dove si potevano collegare diverse area telefoniche contenenti i telefoni che tentavano di comunicare. In questo modo si può drasticamente diminuire il numero di connessioni individuali nella rete, e non bisogna integrare un numero elevato di connessioni all'aggiunta di un singolo elemento. Si indica quindi con commutazione di circuito questo meccanismo di creare una connessione fisica tra due calcolatori, connettendo diverse zone della rete attraverso nodi intermedi. L'interazione tra computer consiste intrinsecamente da grandi

quantità di dati trasmessi velocemente a grandi distanze, per cui hanno bisogno di infrastrutture dedicate massicce, si preferisce quindi questo sistema di nodi intermedi, nonostante non consenta di soddisfare contemporaneamente tutte le coppie di calcolatori.

Poiché questa grande quantità di dati deve attraversare la rete velocemente, si utilizza una diversa tecnica di comunicazione a livello dei singoli messaggi, dividendoli in pacchetti da spedire separatamente. Nella commutazione a datagramma questi pacchetti vengono spediti su linee anche diverse e si mescolano a tutti i pacchetti che attraversano quel percorso. Le linee non sono quindi ad uso esclusivo di una singola connessione. Ma per ricomporre il messaggio originale bisogna combinare questi pacchetti nello stesso ordine in cui sono stati separati, sono necessari dati aggiuntivi per poter riconoscere il loro ordine, perso durante la trasmissione. La distanza attraversata da ciascun pacchetto infatti non è garantito sia uguale.

Esiste inoltre un altro tipo di commutazione a circuito virtuale, dove i pacchetti vengono inviati sullo stesso percorso sequenzialmente, ed ogni linea può essere condivisa da un altro circuito virtuale, quindi non sono ad uso esclusivo. In questo caso invece è necessario un meccanismo per poter distinguere tra di loro questi circuiti virtuali sulla stessa linea fisica.

Si è risolto tramite la commutazione di pacchetto l'esclusività delle linee della rete, introdotta dal modello a commutazione di circuito.

La rete internet moderna utilizza la commutazione a datagramma, per motivi economici e gestionali. Altrimenti sarebbe necessario un gestore della rete che deve trovare un percorso ed attribuirlo ad una coppia ad ogni tentativo di connessione. Data la complessità della rete moderna, lasciare che i pacchetti trovino il percorso autonomamente è la scelta più efficiente. Per realizzare una commutazione a datagramma, piccole aree geografiche diverse vengono coperte da "Internet Service Provider" (ISP) differenti che possono comunicare solamente con altri ISP adiacenti. Quindi all'invio di un pacchetto, se il destinatario non è nella stessa zona dell'ISP corrente, questo lo invia ad un ISP adiacente che crede possa contenere il destinatario, così anche per la ricezione da un altro ISP. In caso il destinatario sia nella zona dell'ISP corrente, questo lo trasmette a lui. Accordi possono essere stipulati da chiunque a chiunque, un ISP ha sempre la necessità di trasmettere i pacchetti attraverso la rete.

In certi casi l'ISP può gestire la rete a circuito virtuale, se sia il destinatario che il mittente siano coperti dal singolo ISP.

## **1.2 Velocità**

Nelle reti LAN e WAN si possono trasmettere dati a velocità diverse:

- LAN: velocità tra 10 ai 100 Mb/s;
- WAN: velocità tra 64 Kb/s ai 200 400 Mb/s.

Le reti WAN presentano molti livelli di retrocompatibilità mantenuti, per cui si possono trasmettere dati a velocità minori di una rete LAN. In generale sono sempre richieste reti a velocità di trasmissione elevata, e connessioni ad alta velocità.

Data una rete si può definire la velocità in due modi differenti. Se si considera il tempo in cui il primo bit del messaggio arriva a destinazione. Le connessioni ad alta velocità vengono realizzate in

linee a fibra ottica, per cui i bit vengono inviati come impulsi di luce, e viaggiano ad una velocità costante, quindi per ogni rete la velocità di trasmissione di un singolo bit è la stessa. Si definisce quindi il tempo di ritardo o delay, il tempo per trasmettere un singolo bit, alla velocità della luce, sulla rete e dipende interamente dalla distanza.

Un pacchetto non viene rappresentato da un singolo bit, per cui non possono essere trasmessi alla stessa velocità, si definisce banda la quantità di bit trasmessi contemporaneamente sulla linea. Questa si chiama banda, e generalmente è sempre possibile comprare più banda in modo relativamente facile, ma è molto difficile comprare meno delay.

### **1.3 Gestione delle Risorse**

La rete è essenzialmente un insieme di risorse interconnesse tra di loro e dalla teoria dei sistemi operativi, il loro controllo può essere descritto da varie attività:

- Verifica dei diritti d'accesso;
- Sequenziamento degli accessi alla risorsa;
- Esecuzione delle operazioni disponibili.

Ad ogni risorsa vengono assegnato almeno un gestore, di numero variabile in base al tipo di gestione. Le modalità di gestione delle risorse sono varie, si dividono in gestione autocratica e multilaterale. Nella gestione autocratica ogni risorsa ha un unico gestore associato ed univoco. Nella gestione multilaterale per ogni risorsa può esserci più di un gestore, si possono identificare quindi tre sottotipi di questa gestione:

- Gestione partizionata, dove attività di gestione viene effettuata da un singolo processo;
- Gestione successiva, dove tutte le attività di gestione vengono effettuate a turni da più processi;
- Gestione replicata, dove tutti i gestori partecipano a ciascuna attività, se ogni gestore ha peso decisionale uguale allora si tratta di gestione democratica.

La gestione replicata fornisce una forte resistenza ai guasti per un numero elevato di gestori che partecipano a ciascuna istanza di una attività, con alto grado di uguaglianza nella responsabilità di gestione. Sono abbastanza diffusi meccanismi di elezione per la scelta dei gestori.

## **2 Modello ISO-OSI**

Per il funzionamento della rete gli standard sono strettamente necessari, altrimenti non sarebbe possibile una comunicazione tra un mittente ed un destinatario qualsiasi, alcuni di questi standard vengono imposti dalla case costruttrici, altri vengono definiti da organizzazioni internazionali, nell'ambito informatico o delle telecomunicazioni. Alcune di queste associazioni come IETF sono indipendenti da stati nazionali, dove varie aziende o istituzioni propongono modifiche di vecchi standard o introduzione e definizione di nuovi.

## **3 Standard IEEE 802**

### **3.1 802.11: WiFi**

### **3.2 802.3: Ethernet**

Un pacchetto ethernet deve comunque avere 512 bit da trasmettere, altrimenti la parte residua del campo dati deve essere riempita di bit di riempimento chiamato padding, inoltre il campo dati può contenere al massimo 1500 Byte.

### **3.3 802.1D: Bridge-Switch**

La connessione instaurata tramite ethernet è bidirezionale simultanea solamente su due calcolatori, ma su una stessa connessione può inviare i dati un solo calcolatore, quindi sono necessarie altre componenti. Un bridge è una componente che consente di connettere tra di loro più di un computer tramite ethernet, comportandosi come se fosse un calcolatore intermedio ai calcolatori della rete, connesso a ciascuno di questi tramite una connessione ethernet.

Inoltre connettendo tra di loro diversi bridge è possibile creare una struttura più articolata, creando una struttura simile ad un albero. La parte wired o cablata delle connessioni LAN vengono instaurate in questo modo.

I bridge svolgono una prima funzione di rendere possibili topologie articolate, effettuando un'operazione di "filtering", per separare tra di loro porzioni di rete che non devono dialogare tra di loro in modo diretto

I bridge sono delle macchine "store & forward", ovvero quando ricevono un pacchetto, prima di essere inviato su altre porte, viene memorizzato e trasmesso su altre porte, analogamente come se fosse un calcolatore, in caso le altre porte siano impegnate a trasmettere altri pacchetti, quindi in caso di traffico. Si può quindi immaginare una coda di pacchetti sulle porte del bridge per essere trasmesse.

Il bridge sono delle tecnologie di livello 2, ed utilizzano algoritmi di instradamento per inviarli ad un MAC address specifico, ma questo tipo di algoritmo viene effettuato a livello 3. Questo non sorge problemi, poiché quest'operazione di instradamento è interna alla LAN, e non coinvolge alcun'altra componente della rete. I bridge devono essere conformi allo standard IEEE 802.1D. Gli standard comprendenti il carattere "D", sono di grande importanza. I sistemi connessi a reti LAN ignorano i bridge, si dicono quindi trasparenti, poiché i calcolatori connessi alla rete non conoscono la loro posizione all'interno della rete.

Un calcolatore per inviare un messaggio ad un altro calcolatore su una rete LAN, invia il suo pacchetto ad un bridge attraverso il suo MAC address. Il bridge quindi utilizza in principio un diverso MAC address, per spedire questo pacchetto al computer di destinazione tramite il suo MAC address. Tra questi due MAC è presente un componente di relay, per trasmettere il pacchetto tra porte diverse del bridge.

Le porte di un bridge possono avere lo stesso MAC o MAC differenti. Poiché il pacchetto è specifico al MAC del bridge, deve ricostruire il pacchetto scartando i campi specifici al MAC address del bridge. Inoltre poiché i pacchetti non sono tutti conformi allo standard IEEE 802.3,

deve ricostruire anche il campo LLC. I MAC address dei computer nella rete sono realizzati in modo da poter essere connessi a ciascun tipo di MAC.

Si vuole che il modello di rete sia "plug & play", ovvero non deve essere dipendente da un intervento umano. I bridge costruiscono la loro tabella di instradamento per identificare dove sono presenti i diversi MAC address, autonomamente attraverso un meccanismo di "learning", salvando questa tabella nel "filtering database". Ogni porta del bridge rappresenta una linea ethernet diversa, identificando un loro dominio di collisione, a cui possono essere connessi diversi calcolatori.

Si considera una rete dove ogni componente connesso è spento, ed una tabella vuota. Appena si accende un calcolatore ed invia un pacchetto da un dominio di collisione, allora il bridge capisce a quale porta corrisponde il MAC address del mittente. Ma ancora non conosce dove si trova il destinatario, quindi lo invia su tutte le sue porte disponibili, su tutta la rete. Invece se conosce la porta dov'è presente il destinatario lo invia solamente su quella porta.

Il learning permette di costruire autonomamente il filtering database di un bridge, questo meccanismo tuttavia non funziona quando la rete presenta una topologia diversa dalla topologia ad albero. Per esempio se è presente un ciclo all'interno della rete, il bridge si vede arrivare un pacchetto dallo stesso MAC address su porte diverse. Ma un albero è una topologia contenente solo "Single Points of Failures" (SPoF) e quindi fortemente sconsigliata, poiché un singolo malfunzionamento causerebbe la perdita di funzionalità dell'intera rete. Per cui data una topologia a grafo, un bridge è in grado di calcolare autonomamente un albero ricoprente della rete, ad ogni cambio di topologia della stessa. I bridge inoltre vengono collegati tra di loro per più di una connessione per evitare altri SPoF, ed evitare che a un singolo guasto la rete venga tagliata in due.

Tramite un meccanismo progressivo i bridge individuano la loro posizione nella struttura dell'albero ricoprente e sono in grado di staccare alcune porte e rimanere collegati sull'intera rete; quando questi bridge rilevano un guasto su una di queste connessioni, riattivano una delle porte disattivate per mantenere in funzione la rete, ottenendo una significativa resistenza ai guasti. Questo tipo di algoritmo di spanning tree verrà trattato in corsi più avanzati di reti di calcolatori.

Le prestazioni di un bridge influenzano le prestazioni dell'intera rete locale, vengono identificate da una serie di parametri. Il numero massimo di pacchetti al secondo processabili dal bridge, rappresentano un collo di bottiglia per i pacchetti che possono essere presenti sulla rete in ogni singolo momento, se vengono inviati un numero superiore ai pacchetti, alcuni pacchetti verranno scartati. Un altro parametro caratteristico è il tempo medio di latenza, ovvero il tempo in cui il bridge prende le sue decisioni ed invia il pacchetto alla porta giusta. Per cui è preferibile avere bridge full speed, ovvero con una velocità pari al massimo teorico. Più corti sono i pacchetti maggiore è il numero di decisioni effettuate nell'unità di tempo. Nello standard IEEE 802.3 a 10 Mb/s, un bridge si definisce full speed, se è in grado di processare 41880 pacchetti al secondo, per ogni porta. Questi esperimenti di verifica a parità di frequenza devono essere effettuati utilizzando pacchetti di lunghezza minima, così ad ogni porta è presente la massima frequenza di funzionamento del bridge. Il pacchetto più piccolo che può essere inviato è da 512 bit, per cui il numero massimo di pacchetti al secondo ad una velocità di 10 Mb/s è di circa 19500 pacchetti, ma il pacchetto comprende anche il preambolo ed lo SFD, per cui vanno aggiunti altri 64 bit, numero di pacchetti al secondo scende quindi a 17300. Tuttavia tra un pacchetto ed il successivo in ethernet è presente l'"interpacket gap" di 96 bit. Per ciascuna tipologia di porta del bridge si effettua questa analisi e si verifica nel caso peggiore quanti pacchetti è in grado di gestire.



Il bridge è un calcolatore, con una CPU, RAM ed interfacce per le diverse LAN, in ROM le funzionalità dello standard. Per bridge più potenti, le porte vengono realizzate tramite schede ASIC, per risolvere il problema dell'instradamento localmente. Le porte vengono realizzate tramite diversi slot che possono essere inseriti o rimossi in base al tipo di porta necessaria. Inoltre sono necessari massicci impianti di raffreddamento per riuscire a mantenere la temperatura del data center. A differenza di un server che può essere rallentato in caso di traffico allentato e quindi diminuire la temperatura, le apparecchiature di bridge non possono spegnersi, e quindi comportano una temperatura costantemente elevata. Bridge di fascia alta sono in grado di effettuare bilanci sulle prese di corrente.

Logicamente sono presenti almeno due porte una "MAC relay entity", per trasmettere i pacchetti tra le varie porte, ed un'entità di livello superiore, per la gestione del bridge, degli algoritmi e dei protocolli. Queste entità di alto livello comunicano con altri bridge attraverso pacchetti per realizzare lo spanning tree.

Le porte del bridge possono essere abilitate o disattivate dall'amministratore di rete. Una porta attiva può essere in stato di "forwarding" o di "blocking", se sono bloccate lo spanning tree lo ha bloccate. Ogni porta ha un indirizzo MAC univoco, e sono numerate progressivamente a partire da uno. Convenzionalmente l'indirizzo MAC del bridge corrisponde all'indirizzo MAC della porta numero uno.

La tabella di instradamento contiene "entries" (righe) statiche o dinamiche. Le righe statiche vengono inserite dall'amministratore a causa di esigenze di sicurezza importanti, altrimenti la posizione del MAC address vengono mantenuti per un tempo finito, configurabile, e di default di 5 minuti. Infatti è possibile che il calcolatore venga spostato spazialmente attraverso la rete, è quindi possibile si colleghi ad una porta differente.

Lo sviluppo di ethernet ha portato alla creazione di meccanismi di controllo di flusso, soprattutto per gli switch. Una richiesta attraverso il bridge può essere di pochi byte verso un server, ma può provocare un trasferimento notevole di dati verso il client, quindi attraverso il bridge ad una porta ad alta velocità, ma questi pacchetti da ritrasmettere verso il cliente passano attraverso una porta di banda minore, quindi la porta più lenta può andare facilmente in saturazione. Viene introdotto quindi tramite lo standard IEEE 802.3x e 802.3bd un controllo di flusso tramite dei "pause frame" un MAC control frame di 512 bit, per fermarsi prima di riprodurre traffico. I pause frame non contengono dati ma contengono informazioni di controllo, e rappresentano una novità, viene quindi implementato attraverso un nuovo sottostato di MAC chiamato MAC control. Il supporto allo standard 802.3x è opzionale e viene negoziato tra le schede alle due estremità del filo.

Prima dello standard 802.3x poiché ethernet era una comunicazione a turni, per impedire la saturazione i bridge potevano inviare pacchetti senza dati prendendo il controllo della connessione.