

# UNA RIVOLUZIONE A DUE FACCE

DALL'ANALOGICO AL DIGITALE E INTERNET

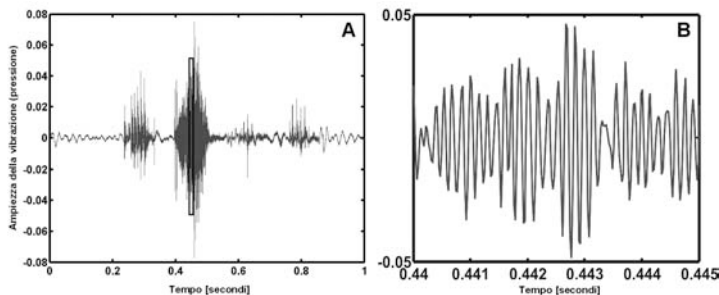
di Carlo Colesanti\*

*In modo sempre più diffuso anche gli utenti «non specializzati» hanno l'occasione di utilizzare strumenti e di compiere operazioni che comportano trasformazione e/o rappresentazione di dati anche complessi in forma digitale. Scopo di questo contributo è illustrare che cosa si intenda esattamente con l'espressione «rappresentazione digitale» di dati di qualsiasi tipologia. A partire dalla definizione di «segnale» si chiarisce la differenza tra segnali analogici e segnali digitali. Si esaminano inoltre i principali vantaggi di tale rappresentazione e si muove qualche passo alla scoperta del più potente strumento di trasmissione dei dati digitali: Internet.*

\*Già assegnista di ricerca presso il Dipartimento di Elettronica e Informazione del Politecnico di Milano.

**P**er prima cosa è opportuno definire il concetto di segnale così come è inteso nei vari rami dell'ingegneria dell'informazione. Si definisce segnale una qualsiasi funzione del tempo (e/o di una o più variabili spaziali) che rappresenta l'andamento di una grandezza fisica: si pensi per esempio alla voce (ampiezza di una vibrazione che varia in funzione del tempo) o a un'immagine in scala di grigi (tonalità che varia in funzione di due variabili spaziali). Per semplicità ci si limita a segnali che sono funzione della sola variabile tempo. Si dice che un segnale è «analogico» se la funzione che lo rappresenta è definita per un intervallo di numeri reali e assume valori corrispondenti ad un altro intervallo di numeri reali. Dominio e codominio hanno, cioè, la potenza del continuo. In termini più colloquiali, pensando a un segnale funzione del tempo come la voce, si può semplicemente dire che il segnale è definito per ogni istante di tempo e può assumere qualsiasi valore.

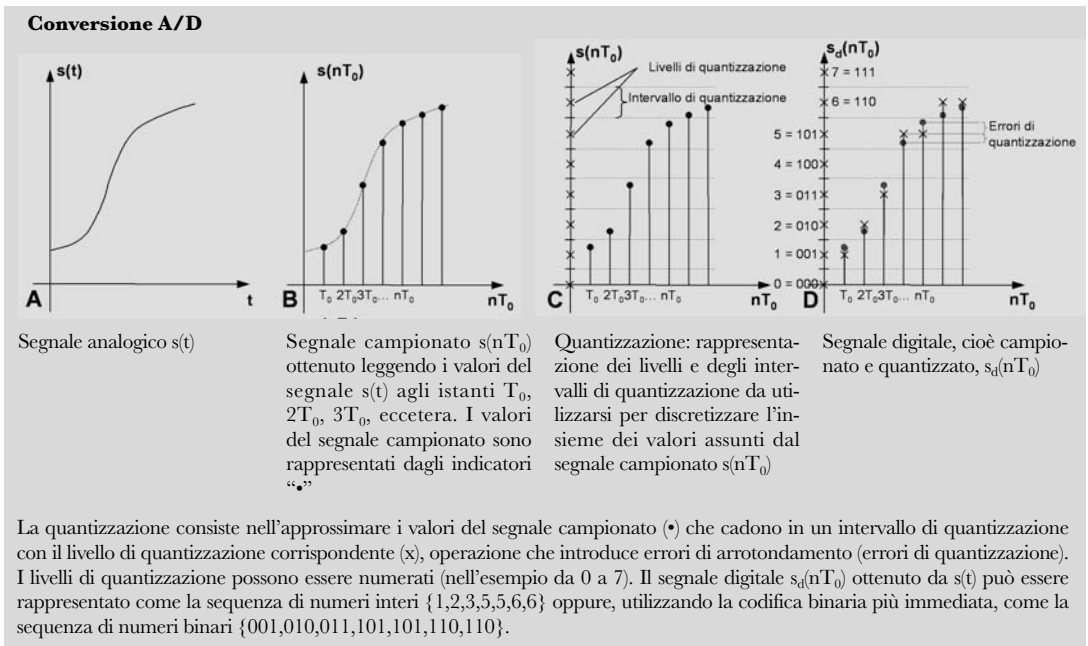
**A**  
Esempio di segnale vocale: ampiezza della vibrazione prodotta dalla voce (pressione sonora) in funzione del tempo  
**B**  
Zoom sulla parte centrale del segnale vocale, che corrisponde al sottile riquadro nero in A



Vale la pena di osservare subito che la realtà fisica è analogica (salvo alcune eccezioni).

Un segnale si dice invece «digitale» o numerico se dominio e codominio sono insiemi finiti. Sempre pensando a una funzione del tempo, il segnale è digitale se è definito solo per alcuni istanti di tempo in corrispondenza dei quali può assumere solo un numero finito di valori. A titolo di esempio, ogni testo scritto può essere considerato come un segnale digitale nella misura in cui interessa solo la sequenza di simboli (lettere e punteggiatura) e non la particolare grafia con cui i simboli sono rappresentati.

È possibile trasformare un segnale analogico in un segnale digitale. L'operazione si chiama conversione analogico-digitale (conversione A/D) e consiste in due successivi passi detti «campionamento» e «quantizzazione».



Nel passo di campionamento il segnale analogico viene «letto» in corrispondenza dei soli istanti di tempo ai quali si è interessati. Si parla di discretizzazione dell'asse del tempo (vedi immagini A e B nel riquadro). In genere il campionamento è uniforme: gli istanti di tempo sono cioè equispaziati. Purché il campionamento sia sufficientemente fitto è possibile ricostruire il segnale analogico a partire dal segnale campionato *senza errore alcuno*. Quest'ultimo è un risultato tutt'altro che intuitivo e di grande importanza, noto come «teorema del campionamento».

Nel passo di quantizzazione si definisce un insieme limitato di valori che il segnale campionato può assumere (livelli di quantizzazione separati da intervalli di quantizzazione) e si arrotonda il valore di cia-

scun campione al livello di quantizzazione più prossimo. Si parla di discretizzazione dell'asse dei valori del segnale (vedi immagini C e D nel riquadro). Proprio perché i livelli di quantizzazione sono in numero finito, a ciascuno di essi può essere associato un codice, per esempio un numero intero progressivo (è questo il motivo per cui i segnali digitali sono chiamati anche segnali numerici). Si dice che l'insieme dei livelli di quantizzazione costituisce un alfabeto finito di simboli, ciascuno dei quali individua un particolare livello. In genere, presto o tardi, i livelli di quantizzazione vengono rappresentati in formato binario, dando vita a una sequenza di *bit* (vedi immagine D nel riquadro). Quest'ultimo passo è chiamato «codifica binaria».

A differenza del campionamento, la quantizzazione è un processo che introduce approssimazioni irreversibili (errori di quantizzazione). Vale, tuttavia, la pena di osservare che l'errore di quantizzazione dipende dai livelli di quantizzazione. In particolare, in caso di quantizzazione uniforme (livelli equispaziati) l'errore introdotto dipende dal solo intervallo di quantizzazione. L'errore di quantizzazione può quindi essere controllato con precisione: in base all'errore massimo che si è disposti a tollerare si fissa l'intervallo di quantizzazione.

Ovviamente è possibile anche effettuare la conversione da digitale ad analogico (conversione D/A), operazione che ha luogo ogni volta che è necessario ricostruire la grandezza fisica rappresentata dal segnale digitale. Per esempio quando si ascolta il suono registrato in forma digitale su un CD o si guarda un film su DVD.

A causa della quantizzazione, la conversione D/A non restituisce in modo esatto il segnale analogico originale.

In sostanza la rappresentazione digitale di grandezze originariamente analogiche implica una perdita di informazione: perdita che è più contenuta di quanto ci si potrebbe aspettare (teorema del campionamento), ma che è assolutamente inevitabile.

È dunque lecito chiedersi come mai, in tutti i campi, la rappresentazione digitale stia sempre più soppiantando la rappresentazione analogica: CD e mp3 hanno rimpiazzato dischi e cassette, i DVD stanno facendo sparire le videocassette. Lo stesso sta succedendo nella fotografia e più lentamente nelle trasmissioni televisive e radiofoniche.

L'interrogativo può essere affrontato da diversi punti di vista. Per ragioni di spazio ci si limita a due.

### *Copia e trasmissione dell'informazione*

Ogni volta che un segnale analogico viene registrato o trasmesso gli si sovrappone inevitabilmente una componente di disturbo aleatorio analogico detto «rumore». Si pensi alla registrazione su una audiocassetta che introduce fruscii aggiuntivi o alla fotocopia di un documento che si traduce in una copia di qualità lievemente deteriorata. Lo stesso succe-

de in sede di trasmissione. Questo fenomeno di sovrapposizione di rumore è particolarmente fastidioso perché ha luogo a ogni iterazione dell'operazione di copia o di trasmissione e le possibilità di «ripulire» il segnale tra una copia e la successiva sono molto limitate.

Il problema è risolto completamente dalla rappresentazione digitale: il rumore analogico introdotto non ha effetto alcuno fintantoché non è di entità tale da invertire il valore di un certo numero di bit della sequenza binaria che rappresenta il segnale digitale.<sup>1</sup>

Riprendendo l'esempio del testo scritto visto come segnale digitale, è immediato osservare che, finché le imprecisioni di trascrizione non sono tali da far confondere tra loro delle lettere simili, il testo rimane perfettamente integro a ogni nuova copia.

In definitiva la conversione A/D introduce un'approssimazione controllabile (l'errore di quantizzazione che è determinato dall'intervallo di quantizzazione) ma permette la rimozione completa delle forme di disturbo aleatorio (molto più difficilmente controllabili) che si sovrappongono in sede di trasmissione o copia.

A prezzo di un rumore di quantizzazione la cui entità si è liberi di scegliere in base all'applicazione particolare, ci si è liberati dal rumore di trasmissione (o registrazione)!

Si tratta di una conquista di portata notevole che sconvolge completamente il panorama usuale di trasmissione e copia dei dati: mentre nel «mondo analogico» tutti gli sforzi sono concentrati a limitare il rumore di trasmissione o copia, nel «mondo digitale» è sufficiente garantire che tali disturbi si mantengano al di sotto di un livello critico. Nella rappresentazione analogica la qualità ottenuta a valle di trasmissione o copia decresce lentamente ma inesorabilmente al crescere del rumore, nella rappresentazione digitale la qualità non varia per un'ampia gamma di livelli di rumore. Però, non appena il rumore raggiunge un livello tale da indurre errori nella trasmissione dei singoli bit del segnale digitale, la qualità comincia a decrescere molto rapidamente al crescere del rumore.<sup>2</sup> Riprendendo l'esempio di prima, non appena si cominciano a confondere sistematicamente tra loro lettere differenti, la trascrizione diviene rapidamente inintelligibile.

La sostanziale immunità agli errori di copia ha aperto scenari nuovi in materia di proprietà intellettuale, soprattutto riguardo alla protezione del diritto d'autore. La perdita di qualità della copia analogica ha limitato a lungo l'appetibilità di copie illecite di registrazioni (soprattutto musicali). Ora che invece le copie digitali sono perfettamente identiche all'originale, la barriera costituita dallo scarto di qualità è completamente sparita.

### *Elaborazione numerica*

Gran parte della fortuna della rappresentazione digitale è legata alla rivoluzione informatica. I dati digitali sono costituiti da una sequenza di

<sup>1</sup> L'effetto di un numero sufficientemente limitato di *bit* ricevuti errati è completamente annullabile utilizzando tecniche di codifica binaria che permettono il riconoscimento e la correzione di errori di trasmissione.

<sup>2</sup> Ce ne si può rendere facilmente conto con un esempio pratico. Riferendosi all'immagine D nel riquadro a pagina 121, un singolo *bit* errato (il primo di una terna) può far sì che una terna "101" (livello 5) sia erroneamente interpretata come "001" (livello 1), con un errore pari a quattro volte l'intervallo di quantizzazione.

livelli di quantizzazione, cioè da una sequenza di numeri interi ideali per essere rappresentati in formato binario e «dati in pasto» a un computer. Tutte le operazioni di elaborazione dei segnali che nel mondo analogico sono eseguite da costosi circuiti elettronici progettati *ad hoc* (e che hanno sistematicamente come vincolo di introdurre il minimo possibile rumore analogico), possono essere effettuate sviluppando qualche *routine software* o addirittura usando del *software* sviluppato da altri. Questo è incomparabilmente più economico e permette di adattare in modo molto più efficace strumenti già disponibili a scenari nuovi senza dover progettare e realizzare daccapo un circuito nuovo.

L'elaborazione numerica su computer o più in generale su *hardware* programmabile (per esempio *Digital Signal Processor*, DSP) ha aperto possibilità impensabili fino a pochi anni or sono. Basti pensare al ritocco di fotografie, dati audio o filmati che ora chiunque può eseguire sul proprio computer: operazioni che ancora molto recentemente erano appannaggio esclusivo degli studi fotografici, musicali o cinematografici (per di più con possibilità più limitate di quelle ora a disposizione di ognuno).

Lo stesso vale in termini di possibilità di diffondere e far conoscere i propri dati: la trasmissione di dati digitali da computer via Internet ha trasformato potenzialmente ciascuno in giornalista (si pensi all'esplosione del fenomeno dei *blog*), insegnante, libero professionista, scienziato, eccetera.

### Reti di telecomunicazioni e Internet

Ci si propone ora di «dare un'occhiata» a come avviene la trasmissione dell'informazione digitale. Si rinuncia a illustrare come i segnali vengono elaborati per essere resi «ideali» alla trasmissione (livello fisico della trasmissione) desiderando, invece, concentrare l'attenzione sulle reti e, in particolare, su logiche e regole di utilizzo delle reti stesse.

Si definisce «rete» una maglia di collegamenti (*link*) tra nodi. Ogni nodo corrisponde a un terminale: per esempio un telefono o un calcolatore, genericamente chiamato *host* o stazione.

#### *Commutazione di circuito e commutazione a pacchetto*

Per illustrare le due principali «filosofie» di gestione di una rete di comunicazione si confrontano la rete telefonica e *Internet*.

Nel caso del telefono, al momento della chiamata, viene stabilita una connessione dedicata e statica tra chiamante e chiamato. In altri termini, paragonando la rete telefonica alla rete stradale, al momento della chiamata viene individuato un percorso (connessione) tra le due parti che saranno coinvolte nella telefonata, percorso che viene riservato per tutta la durata della chiamata (connessione statica). Tutta l'informazione

scambiata viaggia lungo questo stesso identico tragitto e nessun altro utente può far uso delle risorse di rete allocate alle due parti coinvolte nella telefonata (connessione dedicata). In gergo si parla di «commutazione di circuito». Nell'analogia con la rete stradale questa logica di utilizzo può essere paragonata al caso in cui A e B, desiderando scambiarsi dei beni, si vedano riservare una corsia stradale per tutta la durata del processo di scambio.

È abbastanza immediato riconoscere vantaggi e limiti della commutazione di circuito: il fatto che la connessione sia assegnata in esclusiva implica che le prestazioni siano molto stabili nel tempo e semplifichino molto lo scambio di dati in tempo reale: visto che la «corsia» è interamente riservata, è impossibile trovarla intasata di traffico. Il tempo di percorrenza tra un utente e l'altro è sempre lo stesso. D'altra parte si causa un notevole spreco di risorse: basti pensare che oltre il 50% del tempo di una conversazione telefonica si è in silenzio (silenzio vero e proprio ma anche brevi pause tra suoni successivi (vedi figura 1) e che, per tutto questo tempo, nessun altro utente può far uso delle risorse allocate in esclusiva a chiamante e chiamato. Inoltre, se per un qualsiasi motivo la connessione dedicata viene interrotta («corsia inagibile») la comunicazione non può continuare ed è immediatamente e brutalmente conclusa.

La logica adottata per *Internet* è completamente diversa: l'informazione viene spezzettata in pacchetti. Ogni pacchetto è mediamente costituito da circa 1.500 byte e, oltre a un lotto dell'informazione da trasmettere (carico pagante, *payload*), è provvisto di un'interstazione (*header*) in cui sono specificati l'indirizzo di provenienza, l'indirizzo di destinazione e la posizione esatta del *payload* del pacchetto nel complesso dell'informazione da trasmettere. I singoli pacchetti vengono lanciati individualmente nella rete. A ogni bivio ciascuno di essi riceve un'indicazione sulla strada da seguire tenendo conto della destinazione e della situazione di congestione della rete (instradamento, *routing*). I pacchetti giungono, quindi, a destinazione seguendo vie diverse e con tempi di percorrenza diversi. Via via che arrivano, l'informazione trasmessa viene ricostruita estraendo da ciascun pacchetto il lotto di informazione in esso contenuto e sistemando il *payload* estratto nella posizione specificata nell'interstazione. Questo schema di gestione di una rete è detto di «commutazione a pacchetto» (*packet-switching network*).

La commutazione a pacchetto ha caratteristiche opposte alla commutazione di circuito. Poiché l'allocazione delle risorse di trasmissione è dinamica e avviene pacchetto per pacchetto, è possibile sfruttare in modo incomparabilmente più efficiente le risorse a disposizione. Inoltre il malfunzionamento di qualche linea di comunicazione non pregiudica la trasmissione dei dati: i pacchetti saranno semplicemente instradati lungo un percorso differente. Riprendendo l'analogia introdotta precedentemente, una logica di commutazione a pacchetto corrispon-

de a distribuire su più veicoli (pacchetti) i beni che da A devono andare verso B. Ogni veicolo ha con sé un foglio di istruzioni che specifica l'indirizzo di destinazione e quando e come il carico del singolo veicolo deve essere combinato con i carichi degli altri veicoli in modo da ricostruire esattamente il bene trasportato. A ogni bivio sono disponibili informazioni circa lo stato attuale di traffico della rete stradale, le eventuali vie non percorribili e la via più breve da seguire per andare verso B. I veicoli anche se partiti quasi insieme trovano indicazioni diverse ai vari bivi perché le condizioni di traffico possono cambiare molto velocemente.

D'altra parte la commutazione a pacchetto non dà alcuna garanzia relativamente all'ordine in cui i pacchetti arrivano al ricevitore. Inoltre le prestazioni variano fortemente in base allo stato di congestione della rete. Ciò comporta problemi non indifferenti nel caso di applicazioni in tempo reale per le quali non ci si può permettere di aspettare a lungo i pacchetti in ritardo. Si pensi in particolare a una conversazione telefonica: un ritardo maggiore di 1-2 decimi di secondo è percepito come estremamente fastidioso. I pacchetti con un ritardo maggiore vengono considerati persi, il loro contenuto è ricostruito in modo molto approssimativo a partire dai dati dei pacchetti più vicini correttamente arrivati (mascheramento degli errori di trasmissione, *error concealment*). È questo il motivo per cui l'utilizzo di *Internet* per la trasmissione in tempo reale della voce (*Voice Over Internet Protocol*, VOIP) ha cominciato solo recentemente a decollare e a tutt'oggi offre una qualità di servizio senza dubbio inferiore a quella della telefonia tradizionale. (Questo nonostante l'uso di più risorse: la conversione A/D e la codifica vocale per applicazioni VOIP danno generalmente luogo a flussi di 96 o 128 kilobit/sec contro i 64 kilobit/sec della telefonia tradizionale).

### *Cenni storici*

Per prima cosa qualche rapido cenno storico sulla nascita di *Internet*. Potrà sembrare strano, ma pare che all'origine di tutto sia la lotta per il dominio dei cieli. Infatti il progenitore di *Internet* è *ARPAnet* (1969) sviluppato dalla *Advanced Research Projects Agency* (ARPA) del Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti (*Department of Defense*, DOD). L'agenzia ARPA viene costituita subito dopo il lancio del primo satellite artificiale da parte dell'Unione Sovietica (*Sputnik*, 1958) con l'incarico di ampliare e sviluppare programmi di ricerca avanzati che garantiscono agli Stati Uniti di mantenere la *leadership* tecnologica internazionale all'indomani di quello che era stato da molti percepito come il sorpasso da parte del nemico.

Nel giro di pochi anni ARPA (e, più in generale, l'intero DOD) si trova di fronte alla difficoltà di scambiare informazioni tra reti di computer completamente incompatibili tra loro perché basate su regole di comunicazione e formati di archiviazione dei dati completamente diversi e

«proprietari» (cioè sviluppati da un'impresa e in buona parte mantenuti segreti). Per farsi un'idea della gravità del problema basti pensare che l'appalto di fornitura per i pochi e costosissimi computer di esercito, aeronautica e marina militare era stato vinto da imprese diverse, dando vita a una situazione di paradossale incapacità di comunicazione tra le rispettive dotazioni informatiche.

Si pone con prepotenza il problema di mettere in comunicazione tra loro reti di calcolatori che operano secondo regole e convenzioni differenti. Il tutto garantendo la capacità di gestire in sicurezza situazioni di disservizio e di distruzione di singoli terminali e nodi: situazioni tipiche in uno scenario militare che non può prescindere dall'occorrere di perdite.

Lo stesso problema si pone anche in ambito civile: appare particolarmente importante poter condividere i pochi e costosi calcolatori elettronici disponibili tra gruppi di ricerca afferenti a università o centri differenti, risolvendo il problema della mutua incompatibilità.

Nello sviluppare la propria rete i ricercatori dell'ARPA optano fin da subito per la commutazione a pacchetto. All'inizio degli anni Settanta del XX secolo affrontano e risolvono brillantemente il problema dell'incomunicabilità tra reti diverse trasformando *ARPAnet* nella prima rete di reti.

Sempre nel corso degli anni Settanta vengono formalizzati i protocolli TCP e IP che ancora oggi regolano il funzionamento di *Internet*.

### *I protocolli TCP e IP*

Si definisce «protocollo» il sistema di regole e formati utilizzato dai nodi di una rete nello scambiarsi informazioni. *Internet* si basa sull'utilizzo combinato di due protocolli di comunicazione.

Il protocollo tra reti (*Internet Protocol*, IP) che serve a rendere possibile la comunicazione tra reti «eterogenee» definendo un quadro in cui si può operare prescindendo dal supporto fisico usato per la trasmissione. A tal fine il protocollo IP organizza i dati da trasmettere in «pacchetti» (datagrammi IP) mediante di 1.500 byte ciascuno.<sup>3</sup> Ogni pacchetto è caratterizzato da un'intestazione in cui sono specificati il luogo di destinazione (*destination IP address*) e il luogo di origine (*source IP address*). Affinché destinazione e origine siano definiti, il protocollo IP prevede che a ogni terminale connesso a una rete sia associato un indirizzo, detto indirizzo IP e costituito da quattro *byte*, ciascuno dei quali rappresenta un numero tra 0 e 255 (per esempio 131.175.12.34).<sup>4</sup>

Si parla di quadrupla puntata (*dotted quad*) o, più in generale, di notazione decimale puntata (*dotted decimal notation*).

Proprio perché *Internet* è una «rete di reti», la prima parte dell'indirizzo IP serve a identificare la rete locale (*Local Area Network*, LAN) a cui un particolare terminale è connesso (*network identifier*, *netid*). La seconda parte individua invece il singolo computer *host* all'interno della rete locale (*host identifier*, *hostid*).<sup>5</sup> Il numero di *bit* di questa seconda parte

### *Internet Protocol (IP)*

<sup>3</sup> La dimensione massima di un pacchetto IP è di 64 kbyte.

<sup>4</sup> Utilizzando 4 *byte* (IP versione 4, IPv4) il numero massimo di indirizzi IP esprimibili è  $2^{32}$  pari a circa 4,3 miliardi. Numero che agli occhi dei pionieri di *Internet* doveva sembrare pressoché illimitato, ma che ormai minaccia di essere presto raggiunto. Per questo motivo è in corso di introduzione la versione 6 (IPv6) che prevede indirizzi IP di 128 *bit* (16 *byte*).

<sup>5</sup> In perfetta analogia a quanto avviene anche per i numeri di telefono suddivisi in un prefisso e un numero locale.

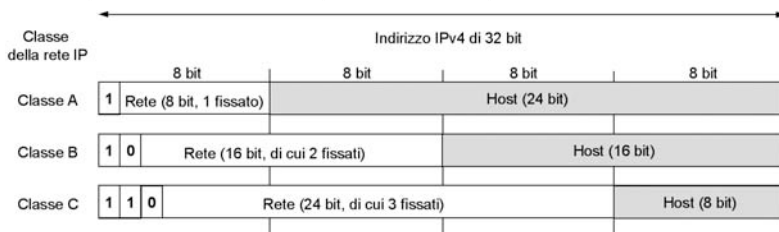


<sup>6</sup> Il numero di elaboratori collegabili è  $2^N-2$  perché due combinazioni sono riservate. La prima (tutti "0") individua la rete locale senza specificare un *host* in particolare, la seconda (tutti "1") individua contemporaneamente tutti gli *host* della rete locale ed è utile per inviare informazioni contestualmente a tutti i nodi della rete (per questo motivo è detto indirizzo di *broadcast*).

Struttura degli indirizzi IP versione 4 (IPv4) di *host* appartenenti a reti di classe A, B e C; la parte di indirizzo che individua la rete locale ha uno o più bit con valore fissato in modo da assicurare che siano rispettati i vincoli menzionati nella nota 5

di indirizzo è il parametro che determina il massimo numero di *host* che può essere collegato a una rete locale. All'origine di *Internet* sono state introdotte reti dette di classe C, B e A, rispettivamente con un *hostid* di 8, 16, e 24 *bit*, in grado cioè di consentire il collegamento di  $2^8-2 = 254$ ,  $2^{16}-2 = 65.534$ ,  $2^{24}-2 = 16.777.214$  *host*.<sup>6</sup>

Ovviamente il *netid* di una rete di classe A sarà costituito da 8 *bit*, quello di una rete B da 16 *bit* e quello di una rete C da 24 *bit*. I *netid* delle reti di classe A, B e C devono soddisfare precise condizioni tese a rendere immediatamente riconoscibile la classe della rete facilitando, così l'instadamento. Nelle reti di classe A il primo numero decimale della quadrupla deve essere compreso da 1 e 126 (in altri termini il primo *bit* del primo ottetto deve essere nullo). Nelle reti di classe B il primo numero è compreso tra 128 e 191 (la prima coppia di *bit* del primo ottetto deve essere 10). Nelle reti di classe C il primo numero è compreso tra 192 e 223 (la prima terna di *bit* del primo ottetto è posta a 110).



Il privilegio di gestire reti di classe B (e a maggior ragione di classe A) è stato riservato a istituzioni come università, grandi imprese e agenzie governative. Così, per esempio, a IBM, Apple e MIT (Massachusetts Institute of Technology) sono state assegnate rispettivamente le reti di classe A 9.0.0.0, 17.0.0.0 e 18.0.0.0, all'Università di Pisa, all'Agenzia Spaziale Europea (ESA) e all'Ufficio Brevetti e Marchi degli Stati Uniti (U.S. Patent and Trademark Office, USPTO) le reti di classe B 131.114.0.0, 131.176.0.0 e 151.207.0.0.<sup>7</sup>

Per completezza vale la pena di osservare che la tradizionale ripartizione delle reti locali in classi è stata affiancata da una notazione degli indirizzi IP che prevede sia specificata esplicitamente la dimensione del *netid* al termine dell'indirizzo. Per esempio, secondo tale notazione, la rete dell'Università di Pisa è rappresentata da 131.114.0.0/16, dove /16 informa che il *netid* è costituito da 16 *bit*. Si parla di *Classless Inter-Domain Routing* (CIDR, *routing* tra domini a prescindere dalle classi). Il grande vantaggio della notazione CIDR è che permette maggiore flessibilità: è possibile scegliere liberamente la lunghezza di *netid* e *hostid*. Ciò permette di ridurre molto l'inefficienza dello schema a classi di fronte alla ampia gamma di possibile dimensioni delle reti locali. Per esempio, non è più necessario che una piccola impresa con una decina di calcolatori metta in piedi una rete di classe C, lasciando poi inutilizzati quasi 250 indirizzi IP. Lo stesso vale, a maggior ragione,

<sup>7</sup> Le assegnazioni delle reti di classe A, B e C ad enti pubblici o privati e imprese sono disponibili *online*, per esempio su <http://ipindex.homelinux.net/>

per una piccola università che, avendo solo qualche migliaio di *host*, bloccherebbe inutilmente decine di migliaia di indirizzi qualora si vedesse attribuita una rete di classe B.

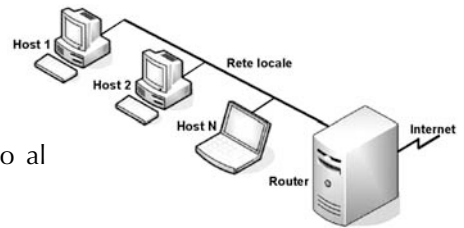
Da ultimo, è solo per maggiore comodità che i siti *web* sono identificati anche da un nome costituito da lettere (nome di dominio, *domain name*). In linea di principio è perfettamente equivalente accedere a [www.uspto.gov](http://www.uspto.gov) o all'indirizzo IP del server di rete - cioè dell'*host* che contiene le pagine del sito *web* - dell'Ufficio Brevetti e Marchi degli Stati Uniti (nella fattispecie l'*host* 151.207.245.67). Anzi, esistono dei nodi della rete (*domain name server*) che hanno proprio il compito di risalire all'indirizzo IP a partire da un qualsiasi nome di dominio.

La comunicazione all'interno di una rete locale è gestita da un *router* che smista direttamente il traffico tra i terminali (della rete locale) secondo un qualsiasi protocollo di comunicazione locale (*routing* diretto). Il *router* funge nel contempo da punto di accesso al mondo esterno.

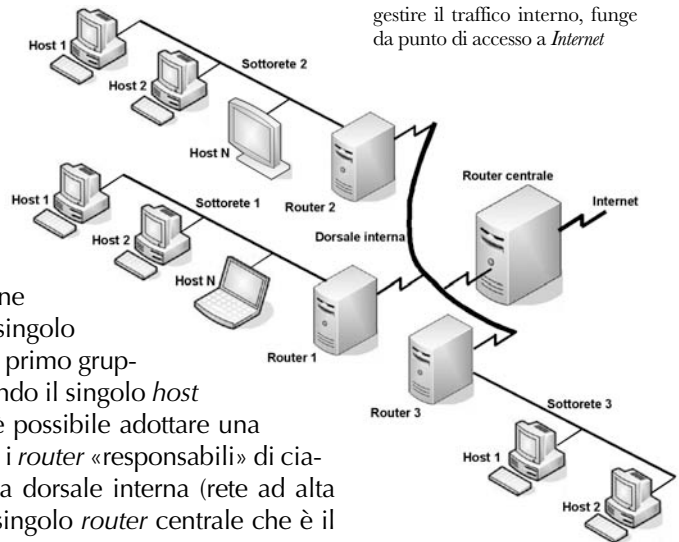
Si occupa, cioè, di adattare il traffico in uscita in modo che sia conforme al protocollo TCP/IP e, se necessario, di riformattare il traffico entrante secondo il protocollo utilizzato localmente (*routing* indiretto). Proprio perché «affacciati» simultaneamente su almeno due reti (la rete locale e *Internet*) i *router* hanno almeno due indirizzi IP (uno per ciascuna rete).

In genere le reti di classe B (e A) sono divise in sottoreti (*sub-networks*). A tal fine la parte di indirizzo che individua il singolo *host* viene a sua volta spezzata in due: il primo gruppo di bit rappresenta la sottorete, il secondo il singolo *host* all'interno della sottorete. In tal modo è possibile adottare una gerarchia con due (o più) livelli di *router*: i *router* «responsabili» di ciascuna sottorete connessi tra loro da una dorsale interna (rete ad alta velocità, in genere in fibra ottica) e un singolo *router* centrale che è il punto di accesso a *Internet*.

Questo tipo di struttura gerarchica presenta il vantaggio notevolissimo di distribuire a diversi livelli il compito dell'instradamento (*routing*) dei dati. Così un qualsiasi *router* di alto livello incontrato sul proprio cammino da un pacchetto che sta viaggiando verso un computer connesso alla rete dell'ESA deve solo saper instradare il pacchetto verso il *router* centrale dell'ESA, sarà poi quest'ultimo a dover capire a quale terminale consegnare il pacchetto. In altri termini il *router* di alto livello non



Rete locale con *router* che, oltre a gestire il traffico interno, funge da punto di accesso a *Internet*



Rete locale suddivisa in sottoreti ognuna delle quali ha un proprio *router*

prende in considerazione la parte *hostid* dell'indirizzo IP di destinazione del pacchetto, ma considera il solo *netid*.

La struttura di *Internet* è abbastanza simile a quella della rete dei trasporti aerei: esiste un numero limitato di *hub* connessi tra loro da dorsali in fibra ottica a velocità di trasmissione elevatissima (analoghi ai grandi aeroporti internazionali collegati da una fitta rete di voli intercontinentali) che reindirizzano il traffico locale verso un *router* di livello gerarchico più basso quanto più possibile prossimo alla destinazione finale (analogo a un piccolo aeroporto internazionale o nazionale) senza, tuttavia, doversi curare dell'esatta destinazione che sarà tenuta in considerazione e risolta a un livello gerarchico più basso.

Con un'altra analogia si può affermare che il meccanismo di «consegna» dei pacchetti è simile al modo gerarchico di procedere dei servizi postali: nazione, CAP (oppure provincia, comune e frazione), indirizzo e, solo da ultimo, destinatario vero e proprio.

Il protocollo di controllo trasmissione (Transmission Control Protocol, TCP) è responsabile di assicurare la ricezione corretta dei dati rendendo al contempo possibile la gestione di errori e anomalie.<sup>8</sup> In particolare, il protocollo TCP prevede che, per ciascun pacchetto arrivato a destinazione, sia inviato al nodo trasmittente un riscontro che conferma la corretta ricezione (riscontro con ritrasmissione, *acknowledgement with retransmission*).

Il nodo trasmittente conserva una copia del pacchetto trasmesso in modo che, se entro un lasso di tempo prestabilito non è arrivato il riscontro (situazione di *timeout*), il pacchetto - che a questo punto può essere considerato perso - viene inviato di nuovo.<sup>9</sup>

Inoltre, il protocollo TCP prevede che ciascun pacchetto specifichi esplicitamente nell'intestazione il progressivo del primo *byte* di *payload* nel complesso dell'informazione da trasmettere insieme con il numero di *byte* contenuti nel pacchetto. (In termini molto colloquiali viene specificato, per esempio, che il pacchetto in esame contiene 1.050 *byte* di dati a partire dal *byte* numero 378.456 del *file* da trasmettere). Queste informazioni permettono al ricevitore di ovviare al fatto che, a causa del meccanismo di commutazione a pacchetto, i dati arrivano in un ordine a priori incognito. È possibile ricostruire esattamente il *file* trasmesso collocando nella corretta posizione i dati di ciascun pacchetto.

### *Routing*

Come già si è detto, sono i *router* ad avere la responsabilità di instradare correttamente i pacchetti in una rete a commutazione di pacchetto. Tale compito è svolto sia all'interno della rete locale affidata a un particolare *router* (*routing* diretto), sia nel gestire le comunicazioni tra i sin-

### *Transmission Control Protocol (TCP)*

<sup>8</sup> Il protocollo TCP svolge anche altre funzioni che in questa sede non vengono discusse; per esempio instaurazione e chiusura di una connessione, utilizzo dei numeri di porta per gestire correttamente i dati in arrivo e in partenza dalle diverse applicazioni attive su un singolo calcolatore.

<sup>9</sup> In realtà il riscontro è genericamente relativo a un «lotto» di *byte* non necessariamente coincidente con un pacchetto

goli *host* della rete locale e il resto di *Internet* (*routing* indiretto). In quest'ultimo caso può essere necessario che il *router* adatti il formato dei dati in ingresso e in uscita dalla rete locale.

È estremamente importante che l'instradamento assicuri una distribuzione bilanciata del traffico sulla rete tenendo in considerazione anche eventuali malfunzionamenti di singoli nodi o collegamenti. In altri termini, per ciascun pacchetto deve essere individuato un percorso quanto più possibile ottimo.

La complessità di tali compiti varia immensamente in funzione del livello gerarchico a cui ha luogo l'instradamento.

Nel caso più semplice di due computer che condividono una singola connessione a *Internet* la funzione di *router* è svolta da una *routine software* attiva sul computer effettivamente in linea che controlla pacchetto per pacchetto se i dati sono indirizzati al computer in linea o all'altro. Tale *routine* usa solo una piccola parte della potenza di calcolo del computer che contemporaneamente può svolgere altre funzioni. A un livello gerarchico un po' più elevato (*router* di una rete di classe C) la funzione di *routing* è svolta da un computer *ad hoc* che, in genere, si accolla anche la gestione della sicurezza dell'accesso a *Internet*.

A livello ancora più alto l'instradamento è effettuato da elaboratori dedicati a elevata potenza di calcolo in grado di smistare centinaia di milioni di pacchetti al secondo.

Fatte salve le differenze di scala, più o meno tutti i *router* svolgono le loro funzioni facendo uso di «tabelle dinamiche di instradamento» che specificano: quali connessioni portano verso quali gruppi di indirizzi IP; i criteri di priorità nell'uso delle connessioni; i criteri di gestione di situazioni di congestione e/o malfunzionamento.

Ciascun *router* aggiorna continuamente la propria tabella di instradamento sfruttando i dati contenuti nelle intestazioni dei pacchetti TCP e IP in transito e scambiando informazioni con altri *router*, nel rispetto del principio fondamentale che la gestione di reti locali (o sottoreti) è interamente lasciata al *router* competente (le relative informazioni sono propagate a livello gerarchico più alto solo se di interesse generale non limitato alla rete locale o alla sottorete).

### *Routing: un piccolo esperimento*

Tutti i sistemi operativi forniscono un'ampia gamma di funzioni che permettono di esplorare e testare il funzionamento della rete.

Tra queste si segnala la funzione *traceroute* (*tracert*) di *Windows* (e *Unix/Linux*) che permette di documentare il percorso dal computer su cui è eseguita l'istruzione *traceroute* a un qualsiasi altro elaboratore in rete, mostrando tutti i nodi che vengono attraversati.

In ambiente *Windows* il comando *traceroute* può essere usato nei seguenti due modi.

## Start - Esegui.

Digitare «tracert indirizzo» dove «indirizzo» può essere sia un indirizzo IP, sia un nome di dominio (per esempio tracert 131.175.12.34 oppure tracert www.polimi.it).

## Start - Tutti i programmi - Accessori - Prompt dei comandi (si apre una finestra DOS).

Digitare «tracert indirizzo» dove «indirizzo» può essere sia un indirizzo IP, sia un nome di dominio (per esempio tracert 131.175.12.34 oppure tracert www.polimi.it).

Se il comando non dovesse essere riconosciuto è necessario portarsi nella directory dove si trova il programma eseguibile tracert.exe. In Windows XP la directory è: C:\WINDOWS\system32; è sufficiente digitare «cd C:\WINDOWS\system32» nella finestra DOS. In Windows 98, NT, e 2000 tracert.exe si trova in directory diverse: C:\WINDOWS oppure C:\WINNT\system32. Se dovesse risultare difficile trovare l'eseguibile tracert.exe, si consiglia di usare la funzione «cerca»: Start - Cerca.

Nell'immagine è riportato un file di testo (\*.txt) prodotto dall'esecuzione di «tracert www.nasa.gov > Nasa.txt». La prima colonna conteggia i nodi (router) attraversati nel tentativo di arrivare al server web della NASA.

Le tre colonne successive contengono il tempo di andata e ritorno (in millisecondi) di tre successivi tentativi di connessione al router individuato dalla quinta e ultima colonna. Ogni nodo è individuato dal suo indirizzo IP ed eventualmente dal suo nome di dominio. Nel caso specifico l'esperimento è stato fatto usando un modem 56 kbit/sec da Leiden (Paesi Bassi). Si nota che i primi nodi attraversati corrispondono a nomi di dominio «kpn.net» (kpn è la *Telecom* olandese, si tratta verosimilmente di router delle reti che kpn usa per offrire Internet ai privati in Olanda). Una volta usciti dalla rete di kpn, si è arrivati molto rapidamente a destinazione, o quasi... Invece che al server web della NASA si è, infatti, giunti alla stazione «a1718.x.akamai.net» con indirizzo IP 84.53.138.34. Tale stazione ospita un mirror (specchio) del sito della NASA: mette cioè a disposizione una copia esatta dei contenuti del sito della NASA. Proprio per questo motivo la stazione mirror ha lo stesso nome di dominio (www.nasa.gov), ma, ovviamente, ha un indirizzo IP diverso. Si ricorre ai mirror per rendere più facilmente accessibile il contenuto di siti particolarmente visitati.

```
nasa.txt - Blocco note
Rilevazione instradamento verso a1718.x.akamai.net [84.53.138.34]
su un massimo di 30 punti di passaggio:
 1 162 ms 179 ms 179 ms asd-dial-uds-cr01.nl.kpn.net [194.151.228.122]
 2 176 ms 179 ms 173 ms asd-dc2-ias-ar15.nl.kpn.net [194.151.228.121]
 3 176 ms 179 ms 179 ms asd-dc2-ipc-dr04.nl.kpn.net [195.190.237.211]
 4 180 ms 179 ms 191 ms asd-dc2-ipc-br02.nl.kpn.net [195.190.233.53]
 5 179 ms 179 ms 179 ms asd-dc2-ias-csg01.nl.kpn.net [195.190.227.202]
 6 168 ms 179 ms 179 ms 67.17.199.169
 7 182 ms 191 ms 197 ms AKAMAI-TECHNOLOGIES-INC.glabf1tether.net3-14.ar.FRA3.gblx.net [64.213.33.226]
 8 185 ms 191 ms 185 ms 84.53.138.34
Rilevazione completata.
```

```
Prompt dei comandi - tracert www.uspto.gov
Microsoft Windows XP [Versione 5.1.2600]
(C) Copyright 1985-2001 Microsoft Corp.
C:\Documents and Settings\Carlo>tracert www.uspto.gov
Rilevazione instradamento verso www.uspto.gov [151.207.245.67]
su un massimo di 30 punti di passaggio:
 1 212 ms 215 ms 215 ms asd-dial-uds-cr01.nl.kpn.net [194.151.228.122]
 2 204 ms 179 ms 179 ms asd-dc2-ias-ar15.nl.kpn.net [194.151.228.121]
 3 171 ms 231 ms 257 ms asd-dc2-ipc-dr04.nl.kpn.net [195.190.237.211]
 4 269 ms 269 ms 269 ms asd-dc2-ipc-br02.nl.kpn.net [195.190.233.53]
 5 195 ms 179 ms 179 ms 195.190.233.249
 6 269 ms 269 ms 257 ms nyk-s1-rou-1001.US.euro-rings.net [134.222.231.23]
 7 382 ms 251 ms 257 ms te4-3-10C.ar4.NYC1.gblx.net [64.209.95.157]
 8 252 ms 257 ms 263 ms te3-1-10g.ar5.NYC1.gblx.net [67.17.100.246]
 9 269 ms 251 ms 257 ms 0.ge-7-1-0.BR2.NYC4.ALTER.NET [204.255.169.125]
10 247 ms 269 ms 251 ms 0.ge-5-2-0.XL3.NYC4.ALTER.NET [152.63.3.165]
11 260 ms 767 ms 269 ms 0.so-6-0-0.XL1.TCO4.ALTER.NET [152.63.32.69]
12 270 ms 275 ms 281 ms POS6-0.GM2.TCO4.ALTER.NET [152.63.43.41]
13 Richiesta scaduta.
```

L'immagine a fianco è stata catturata durante l'esecuzione di «tracert www.uspto.gov» da una finestra DOS. In questo caso la richiesta di connessione al router successivo inoltrata dal router con indirizzo IP 152.63.43.41 è «scaduta». Non è cioè stata ottenuta risposta entro un tempo limite stabilito. Ciò potrebbe essere stato causato da un qualche problema al collegamento o al router dal quale non si è ottenuta risposta.

Digitando «tracert indirizzo > NomeFileUscita.txt», il risultato dell'esecuzione di tracert non viene mostrato a video, ma scritto nel file di testo NomeFileUscita.txt (nella directory in cui ci si trova al momento del lancio di tracert). Il file NomeFileUscita.txt può successivamente essere consultato usando il Notepad o Word.