

3.3 Codifica analogica e codifica digitale

Queste dispense sostituiscono il paragrafo 3.3 del testo "Introduzione ai sistemi informatici".

All'inizio del corso è stata presentata la differenza tra segnale analogico e segnale digitale: il segnale analogico è una modalità di rappresentazione di variabili fisiche (tempo, temperatura, suono...) in cui una grandezza fisica è rappresentata mediante un segnale legato alla prima da una relazione d'analogia. Questo segnale varia in modo continuo assumendo tanti valori quanti sono quelli assunti dalla grandezza fisica. Il segnale analogico è quindi un segnale che varia con continuità nel tempo. Il segnale digitale è invece una modalità di rappresentazione di variabili fisiche nel quale la grandezza fisica è rappresentata da valori numerici (dall'inglese digit = cifra) che variano in modo discreto. Il segnale digitale in pratica può assumere soltanto un numero finito di valori su un tempo finito. Poiché tali valori sono numerabili, il segnale prende anche il nome di segnale numerico. Questo è il tipo di segnale che può essere elaborato da un sistema informatico e trasmesso tramite un moderno sistema di trasmissione digitale.

Solitamente l'informazione a disposizione non si trova già in formato digitale, ma deve essere trasformata per essere rappresentata in questa modalità. Vediamo quindi come è possibile convertire il segnale analogico stesso in forma numerica.

3.3.1 La conversione analogico/digitale

Il processo di conversione di un segnale analogico in uno digitale avviene tramite due fasi di discretizzazione: il campionamento (discretizzazione temporale) e la quantizzazione (discretizzazione dei livelli). Infine ci sarà una fase di codifica che permette di ottenere il segnale nella forma numerica finale. A tutto ciò provvedono due circuiti: il ADC (Analogic to Digital Converter) che trasforma i segnali analogici in digitali e il DAC (Digital to Analogic Converter) che trasforma i segnali digitali in analogici.

3.3.1.1 Il campionamento

Con il processo di campionamento, si considerano solamente i valori che il segnale assume in istanti di tempo prefissati, abbastanza ravvicinati tra loro. È abbastanza intuitivo che se si specificano i valori che il segnale assume in un numero finito di istanti sufficientemente vicini tra loro, l'andamento del segnale nei restanti punti può essere ricostruito a partire dai valori conosciuti. Questo, ovviamente, è vero solo a patto che i valori conosciuti corrispondano ad istanti sufficientemente vicini tra loro. Altrettanto intuitivamente si può capire come più il segnale varia rapidamente più i valori noti devono essere vicini tra loro, così che tra un campione all'altro non possano verificarsi variazioni imprevedibili.

La distanza tra due successivi valori noti del segnale è solitamente detta *passo o periodo di campionamento* ed i valori assunti dal segnale negli istanti noti, *campioni del segnale*. Ricordando che la rapidità con cui un segnale varia è legata al suo contenuto in frequenza (segnali con un alto contenuto in frequenza variano più rapidamente), si capisce come una scelta del passo di campionamento debba essere legata alla banda di frequenze occupate dal segnale.

Il valore del *periodo di campionamento* T_C viene scelto in base al cosiddetto Teorema del Campionamento (o Teorema di Shannon). La dimostrazione di tale teorema esula dallo scopo del corso, ma il suo significato pratico può essere descritto anche senza addentrarsi in complesse trattazioni matematiche.

Il teorema afferma che il numero dei campioni nell'unità di tempo deve essere almeno pari al doppio della frequenza massima del segnale che si vuol produrre; il numero di campioni considerato nell'unità di tempo si chiama "frequenza di campionamento" del segnale legata al periodo di campionamento dalla relazione $f_c = 1/T_c$. In altre parole, un segnale analogico può essere ricostruito a partire dalla sua versione campionata, se e solo se il segnale originale è a banda limitata tra $-B$ e $+B$, e se il periodo di campionamento T_c è minore dell'inverso del doppio della frequenza più alta del segnale originale ($T_c < 1/(2B)$). Se non rispettiamo il teorema, succede che il segnale campionato non riuscirà a descrivere esattamente il segnale analogico di partenza, e si avranno invece delle componenti indesiderate. Questo fenomeno prende il nome di Aliasing.

3.3.1.2 La quantizzazione

Il secondo processo è la quantizzazione. Tramite il campionamento è possibile descrivere un segnale specificandone il valore assunto in un numero finito di istanti opportunamente spaziatati. Anche dopo che è stato campionato, però, il segnale non è in una forma utile per essere manipolato da un elaboratore elettronico. Questo perché una rappresentazione esatta dei singoli campioni richiederebbe una quantità di memoria infinita. Si consideri, ad esempio, il caso di un campione che assume un valore pari a $\sqrt{2}$: tale valore rappresenta un numero reale con infinite cifre decimali e quindi la sua rappresentazione esatta richiederebbe una quantità di memoria infinita.

In generale non siamo interessati al valore esatto del campione, ma siamo disposti ad accettare anche un valore approssimato purché l'approssimazione sia abbastanza accurata. In pratica, si fissa una precisione ritenuta sufficiente al nostro uso e ci si limita a specificare il valore dei campioni con tale precisione.

Questa operazione di limitazione del numero di cifre decimali usate per rappresentare i campioni va sotto il nome di *quantizzazione* del segnale campionato. Il processo di quantizzazione dei campioni di un segnale è ottenuto così: per prima cosa si determina la precisione con la quale i campioni devono essere rappresentati, dopodiché si suddivide l'asse delle ordinate in tanti intervalli ognuno dei quali ha un'ampiezza pari alla precisione richiesta. Se, ad esempio, si decide di rappresentare i campioni fino alla loro prima cifra decimali, ogni intervallo unitario sarà suddiviso in dieci parti uguali (0, 0.1, 0.2, ...). Infine, a tutti i campioni che cadono in un certo intervallo viene assegnato il valore quantizzato più vicino (arrotondamento) o il valore quantizzato immediatamente inferiore al valore esatto (troncamento).

3.3.1.3 La codifica

L'ultimo processo è la codifica, che ad ogni campione quantizzato fa corrispondere un numero binario, cioè una sequenza di bit.

Più esattamente, una volta definiti i livelli di quantizzazione mediante i quali approssimare i campioni del segnale, ad ognuno di essi viene fatto corrispondere un diverso numero binario. Sono tali numeri binari che vengono dati in pasto al computer per la loro eventuale memorizzazione o elaborazione.

Dato il numero di livelli di quantizzazione usati, mediante l'equazione precedente è possibile ricavare immediatamente il numero di bit necessari alla codifica dei campioni. Il numero di livelli, a sua volta, può essere determinato a partire dalla precisione richiesta e dalla massima escursione del segnale in ingresso. Se ad esempio, un segnale da convertire varia da $+10V$ a $-10V$, e lo si vuole quantizzare con una precisione di $0.1V$, sono necessari $20/0.1 = 200$ livelli di quantizzazione, per rappresentare i quali è necessario usare 8 bit.

E' fondamentale notare che mentre il campionamento non comporta alcuna perdita delle caratteristiche del segnale (il quale, purché siano verificate le condizioni dettate dal Teorema del campionamento, può essere perfettamente ricostruito a partire dai suoi campioni), la quantizzazione provoca una perdita, in quanto i valori numerici quantizzati non sono uguali a

quelli originali che sono andati persi nel processo di arrotondamento o troncamento legato alla quantizzazione.

3.3.2 Audio, immagini e video in formato digitale

Immagini e suoni sono fenomeni che sembrano intrinsecamente analogici, nei quali cioè abbiamo a che fare con sfumature continue (di colori, di tonalità). Vediamo adesso come si possono rappresentare in formato digitale le più comuni modalità di informazione, oltre ai testi (già descritti in precedenza nel libro): audio, immagini e video.

3.3.2.1 I suoni e le immagini in formato digitale

Con i suoni, la trasformazione del dato analogico in dato digitale si basa sul processo di campionamento e quantizzazione - il più raffinato possibile - dell'onda sonora di partenza. Ognuno di questi campioni ottenuti sarà identificato dai suoi valori sugli assi del piano cartesiano, e questi valori, naturalmente, sono dei numeri: sappiamo dunque bene come rappresentarli attraverso una codifica binaria. Ecco allora che la successione di questi valori (assieme alle necessarie informazioni sullo spettro delle frequenze considerate e sulla frequenza di campionamento, che ci dicono in sostanza quanto è esteso lo spettro sonoro considerato e quanto è accurata la nostra segmentazione della funzione d'onda, ovvero quanto 'fitta' è la nostra griglia) ci fornisce quella rappresentazione numerica, e dunque quella digitalizzazione dell'onda sonora, che stavamo cercando. Naturalmente, un sonoro stereofonico ci imporrà di considerare separatamente le onde sonore dei due canali corrispondenti agli altoparlanti di destra e di sinistra.

Nel campo dei suoni, la qualità ottenibile attraverso la digitalizzazione è già molto alta, tanto che ormai la resa audio dei Compact Disc musicali (che contengono informazione in formato digitale) ha superato quella dei vecchi dischi di vinile (nei quali l'informazione sonora era registrata in formato analogico). Es. la qualità audio CD è di una frequenza di campionamento di 44.100 Hz (poco sopra al limite di Shannon, dato che un segnale musicale ha una banda di circa 20 KHz) e una quantizzazione a 16 bit (rappresento $2^{16}=65536$ valori di ampiezza diversi).

Per digitalizzare un'immagine, il primo passo è proprio quello di 'sovrapporre' all'immagine analogica (ad esempio una fotografia) una griglia fittissima di minuscole cellette. Ogni celletta sarà considerata come un punto dell'immagine, chiamato pixel (picture element). Naturalmente, a parità di immagine, più fitta è la griglia, più piccole saranno le cellette, e migliore sarà l'illusione di un'immagine continua.

In questo modo, abbiamo sostanzialmente 'scomposto' l'immagine in tanti puntini, abbiamo cioè operato l'operazione di campionamento. Ma non abbiamo ancora risolto il problema della quantizzazione e codifica digitale. Per farlo, occorre un passo ulteriore: rappresentare i puntini attraverso numeri. Come procedere? L'idea di base è semplice: utilizzare anche qui una tavola di corrispondenza, che faccia corrispondere numeri a colori diversi, o a sfumature diverse di colore.

In definitiva, si ha che il prodotto tra risoluzione dello schermo e numero di colori utilizzabili fornisce la quantità di memoria necessaria per rappresentare graficamente il contenuto dello schermo del computer.

I primi personal computer con capacità grafiche, all'inizio degli anni '80, utilizzavano griglie molto larghe (i pixel sullo schermo del computer più che a minuscoli puntini corrispondevano a grossi quadrati) e i colori codificati erano molto pochi (solo il bianco e nero, o al più 8 o 16 colori diversi). L'effetto non era un granché, ma i bit utilizzati per rappresentare l'immagine non erano troppo numerosi. Ad esempio, una griglia di 80 colonne per 60 righe comprende $80 \times 60 = 4800$

pixel, e se ci limitiamo a due colori (bianco e nero) possiamo rappresentare ogni pixel attraverso un solo bit: l'1' potrà rappresentare il nero e lo '0' il bianco. Con 4800 bit avremo dunque codificato un'immagine, anche se solo in bianco e nero, e ben poco definita.

Se abbiamo a disposizione un numero maggiore di bit, potremo rendere più fine la griglia, oppure aumentare il numero dei colori, o fare tutte e due le cose insieme. Così, se ad esempio per ogni celletta decidiamo di 'spendere' 8 bit (e dunque 1 byte) anziché 1 bit soltanto, anziché usare solo il bianco e nero potremo codificare 256 colori diversi: quando si parla di immagini 'a 256 colori' o 'a 8 bit' ci si riferisce proprio a un'immagine la cui palette di colori - ovvero l'insieme dei colori utilizzati - è codificata in questo modo. Se di bit ne possiamo spendere 16, avremo a disposizione 65.536 colori diversi, e così via. Certo, con l'aumento della risoluzione e la crescita del numero dei colori codificati, il numero di bit necessario a rappresentare la nostra immagine sale molto: supponiamo di voler utilizzare una griglia di 800 colonne per 600 righe (è una risoluzione assai diffusa per i personal computer), e di destinare a ogni celletta, a ogni pixel, 24 bit (il che ci consentirà di distinguere la bellezza di oltre 16 milioni di sfumature di colore). I bit necessari per rappresentare una singola immagine diventano $800 \times 600 \times 24 = 11.520.000$.

3.3.2.2 Il video in formato digitale

Armati dei risultati conseguiti con suoni e immagini, possiamo affrontare adesso il problema della digitalizzazione dei filmati, ovvero di immagini in movimento con accompagnamento sonoro. Se pensiamo a come è fatta una vecchia pellicola cinematografica, ci risulterà chiaro che un filmato è una successione di fotogrammi (ciascuno dei quali corrisponde a un'immagine statica), accompagnata da una banda sonora. Ma a questo punto sappiamo come digitalizzare tanto le immagini che corrispondono ai singoli fotogrammi, quanto il sonoro che le accompagna. Certo il numero di bit impiegati nell'operazione aumenta vorticosamente.

Per essere esatti, aumenta in funzione di almeno cinque fattori: il numero di bit necessari alla codifica sarà infatti proporzionale a:

- la durata del filmato;
- la sua risoluzione grafica;
- la 'palette' di colori utilizzata;
- il numero di fotogrammi (o frame) per secondo;
- la qualità del sonoro.

Per quanto la nostra 'disponibilità di bit' sia notevolmente aumentata col tempo, il cosiddetto 'full motion video' digitale (la capacità cioè di rappresentare a pieno schermo immagini in movimento, con una risoluzione e con una fluidità simile o migliore rispetto a quelle televisive) è un traguardo raggiunto solo di recente, e non in tutti i casi. Per quanto riguarda il video digitale, dunque, gli ulteriori prevedibili progressi nelle capacità di memoria e nella velocità di elaborazione dei computer potranno ancora portare a un significativo miglioramento della qualità.

3.3.3 Compressione

Per cercare di risolvere il problema dato dalla disponibilità insufficiente di memoria per poter utilizzare in modo efficiente audio, immagini e video in formato digitale, sono stati introdotti gli algoritmi di compressione. Compito specifico di un algoritmo di compressione è trasformare la sequenza di byte che costituisce un file in una differente sequenza più breve, sfruttando complessi algoritmi matematici. Ovviamente, poiché una sequenza di byte che compone un file compresso non sarà utilizzabile per riprodurre il contenuto nel file originale, occorre che qualsiasi formato di compressione sia reversibile: in genere, se un programma ha la capacità di salvare un file in un formato compresso, è anche in grado di leggere i file che sono stati compressi con quel particolare formato, ripristinando l'informazione in essi contenuta, cioè

decomprimendoli. In linea di massima, comprimere un file vuol dire eliminare tutte le componenti non essenziali (o ridondanti), tentando però di mantenere il più possibile inalterata la qualità originaria utilizzando a questo scopo i metodi più opportuni.

In virtù di quanto detto sopra, la principale differenza che possiamo stabilire tra i formati di compressione è data dalla misura della loro reversibilità. Un formato che è in grado di restituire, al termine della decompressione, un contenuto esattamente uguale – bit per bit – all'originale com'era prima che venisse compresso, viene normalmente definito lossless, cioè **senza perdita**. Viceversa, un formato di compressione che non può assicurare una reversibilità assoluta, viene definito lossy, ovvero, in italiano, **con perdita**. La cosa che si perde o non si perde è la fedeltà all'originale del contenuto ripristinato.

Occorre conoscere perfettamente le caratteristiche dei formati di compressione che si adoperano, se si vuole ottenere il meglio dalle manipolazioni che si effettuano sui file. Sarebbe infatti un grave errore salvare e risalvare un file in un formato lossy come il JPG, per poi utilizzarlo alla fine in un formato "senza perdita" come il TIF. E' invece corretto fare il contrario, ovvero salvare quante volte si vuole un lavoro in corso d'opera in un formato non distruttivo, per poi salvarlo solo alla fine, se necessario, in un formato distruttivo. La regola (e la logica) vuole, insomma, che l'archiviazione in un formato lossy sia sempre l'anello conclusivo della catena di trasformazioni a cui è sottoposto un file. A questo punto nasce una domanda scontata: perché mai usare un formato di compressione distruttivo, se esistono sistemi non distruttivi che permettono di comprimere e decomprimere uno stesso file infinite volte, conservando tutte le informazioni in esso contenute? La risposta è che in molti casi la quantità di spazio che una compressione non distruttiva (lossless) riesce a salvare è di molto inferiore al risparmio di spazio ottenibile per mezzo di una compressione distruttiva (lossy). L'efficienza della compressione viene calcolata dividendo la grandezza originale del file per la sua grandezza una volta compresso. In inglese questo valore si chiama compression rate o, alla latina, ratio; in italiano possiamo chiamarlo **coefficiente** o **fattore di compressione**.

Ma vediamo, per mezzo di una tabella riassuntiva, i guadagni di spazio che si possono ottenere con ciascuno dei due metodi di compressione dei file grafici.

RAPPORTI DI COMPRESSIONE OTTENIBILI	Tipi di compressione		
	Non distruttiva (lossless)	Distruttiva (lossy)	
Immagini naturali (foto digitali, scansioni)	1:1,5 - 1:2	1:1,5 - 1:30	senza una visibile perdita di qualità
		1:10 - 1:300	con perdita di qualità
Immagini artificiali (disegni, fumetti)	1:1,5 - 1:20	1:1,5 - 1:300	

Questa tabella ci dice, quindi, che un file grafico di 1024 x 768 pixel in modalità RGB, che, come abbiamo visto più sopra, occupa in forma non compressa 2.304 Kb, può "dimagrire" con una compressione non distruttiva fino a ridursi, nel migliore dei casi, a poco più di 115 Kb, cioè un ventesimo della grandezza originaria. Questo, però, se l'immagine rappresentata nel file è un disegno, un fumetto. Nel caso sia invece una foto, il meglio che possiamo sperare dalla compressione non distruttiva è un dimezzamento del peso del file: da 2.304 a 1.150 Kb circa.

Ben diversi sono i fattori di compressione che possiamo ottenere ricorrendo all'uso di formati distruttivi. Il file contenente la scansione di una foto può ad esempio essere ridotto fino ad un trentesimo circa della grandezza originaria (cioè meno di 77 Kb sui 2.304 Kb di partenza del nostro esempio) senza alcuna perdita di qualità apparente. Se, poi, non ci infastidisce un certo progressivo, visibile degrado dell'immagine, possiamo ottenere fattori di compressione addirittura del 300 per cento, che porterebbero il nostro file da 2.304 a poco meno di 8 Kb!

Evidente, dunque, la necessità di usare per la fruizione su Internet, soggetta alla lentezza delle connessioni via modem, i formati distruttivi, grazie alle loro superiori capacità di compressione.

3.3.4 Bit rate

Il bit rate indica la quantità di dati che possono transitare, nell'unità di tempo, attraverso un canale di comunicazione e che normalmente è misurata in bit al secondo (bps). Vediamo adesso alcuni esempi per renderci conto dei valori di bit rate necessari per trasmettere i più comuni tipi di segnale.

Il bit rate di un segnale vocale telefonico è di circa 64.000 bps: la banda occupata dal segnale analogico vocale, trasmesso dal telefono, è infatti $B = 4$ KHz. Per il Teorema del campionamento, occorre campionare il segnale con un passo di campionamento $T_c = 1/(2B) = 1/8000 = 125$ ms. Ovvero, occorre trasmettere 8000 campioni al secondo. Usualmente si quantizzano questi campioni con 256 livelli, per cui servono 8 bit per ogni campione. Da cui il risultato, $\text{bit rate} = 8 \cdot 8000 = 64$ Kbps.

Il bit rate di un segnale musicale monofonico è di circa 320.000 bps: la banda di un segnale musicale è infatti di circa 20 KHz, per cui occorre campionare il segnale analogico con circa 40000 campioni al secondo. Se ancora una volta si utilizzassero 8 bit per campione, si otterrebbero 320 Kbps.

Per trasferire un filmato a pieno schermo e a pieno movimento necessita invece una ampiezza di banda di circa 10.000.000 bps. La quantità di banda necessaria ad un'applicazione varia molto a seconda della grandezza dei frame, del frame rate e del metodo di compressione adottato. La Tabella può dare un'idea approssimativa dell'utilizzo della banda da parte delle applicazioni multimediali più comuni.

Bit rate richiesto	Tipo di applicazione
8 kbps	Audio di qualità telefonica
100 kbps	Semplice condivisione di applicazioni
128 kbps - 1 Mbps	Videoconferenza
1,54 Mbps	Video MPEG
8 Mbps - 100 Mbps	Trasmissione di immagini in movimento
> 100 Mbps	Realtà virtuale

Dalla tabella possiamo notare che già per eseguire una video conferenza occorre un bit rate che va da 128 kbps a 1 Mbps, maggiore è il valore tra i due estremi e migliore sarà la trasmissione di immagini e suoni. Il bit rate è quindi la capacità di trasmettere informazioni lungo un canale di comunicazione in un determinato tempo.

3.4 Convergenza al digitale

Possiamo dirci soddisfatti: armati solo degli '0' e '1' della codifica digitale abbiamo affrontato tipi di informazione molto diversa - dai numeri al testo scritto, dai suoni alle immagini e al video in movimento - e siamo riusciti a rappresentarli tutti.

Possiamo capire - e considerare in certa misura quasi profetico - lo slancio delle parole con le quali all'inizio del '700 il filosofo tedesco Gottfried Wilhelm Leibniz che può essere considerato l'inventore del calcolo binario, parlava della sua scoperta. Leibniz sosteneva: *"il calcolo binario, che utilizza lo '0' e l'1", a ricompensa della sua maggiore lunghezza è il più fondamentale per la scienza, ed è all'origine di nuove scoperte (...) la cui ragione è che allorché i numeri sono ridotti ai principi più semplici, e cioè allo '0' e all'1', appare ovunque un ordine meraviglioso"*.

Perché la trasformazione in formato digitale dell'informazione è così importante, tanto da far parlare di *rivoluzione digitale* o di *convergenza al digitale* (è così che ci si riferisce spesso al progressivo trasferimento verso il formato digitale di tipologie di informazione tradizionalmente collegate a media diversi)? Per quello che abbiamo detto finora, potrebbe in fondo trattarsi di una tecnica di rappresentazione come un'altra, utile magari per capire come funzionano i

computer quando lavorano con testi, suoni o immagini, ma priva di una particolare portata 'rivoluzionaria'.

Ci sono infatti due fattori che rendono così potente la rappresentazione in formato digitale delle informazioni.

Innanzitutto, il computer non è solo o principalmente uno strumento per rappresentare in forma statica i nostri dati, la nostra informazione: al contrario, è uno strumento potentissimo per lavorare su questa informazione, conservandola, elaborandola, e, se lo si desidera, trasmettendola a distanza attraverso le reti telematiche.

In secondo luogo, la disponibilità di un unico linguaggio (la codifica digitale) per rappresentare informazione di molti tipi diversi, associata alla disponibilità di un unico strumento (il computer) per gestire ed elaborare questa informazione, permette un livello di integrazione totalmente nuovo. Tradizionalmente, i supporti utilizzati per i testi scritti (nel mondo 'gutenberghiano' nel quale abbiamo vissuto finora, soprattutto la carta stampata: libri, giornali, riviste...) erano diversi, nelle tecnologie impiegate e nei modi di fruizione, dai supporti utilizzati per i suoni (pensiamo ad esempio a dischi e audiocassette), da alcuni di quelli usati per le immagini (negativo fotografico, diapositive...) o per i filmati (pellicola cinematografica, videocassetta...).

Con il digitale, questa situazione cambia radicalmente. Informazioni di tipo diverso vengono tutte ridotte allo stesso codice di base (lunghe catene di '0' e '1') e gestite attraverso lo stesso strumento di base (il computer): un CD-ROM, o il disco rigido di un computer raggiungibile attraverso la rete Internet, possono così offrire insieme testi, suoni, immagini, video in movimento; un 'telegiornale digitale' può essere fatto di servizi filmati, ma anche di testi scritti (da leggere e magari da stampare sulla stampante del nostro computer, e sui quali potremo effettuare ricerche), e potrebbe essere ricevuto attraverso un qualunque canale in grado di trasmettere informazione in formato digitale (tramite cavi, satelliti, onde radio...); su un CD (e dunque su un unico medium) un brano sonoro può essere accompagnato dal testo che lo descrive e dalle immagini della sua esecuzione; una trasmissione digitale via satellite può contenere immagini, ma anche testi, o magari programmi per computer.

Appunti tratti da:

- dispense su "Educazione al multimediale", su www.mediamente.rai.it
- "Algoritmi di compressione per i formati grafici", su www.diodati.org
- Dossier MP3, su www.html.it.