

**Luca Mari**

**Atomi & Bit**

**Le ragioni del digitale e del multimediale**

quarta di copertina

Luca Mari è professore associato di Misure Elettriche ed Eletttroniche presso la facoltà di Ingegneria dell'Università Cattaneo – LIUC di Castellanza (Va) e docente in corsi di strumentazione elettronica di misura, teoria dei sistemi e informatica. È autore di vari articoli pubblicati su riviste scientifiche internazionali e relativi ai problemi dei fondamenti della misurazione, e dei libri *Economia del cambiamento tecnologico*, Guerini Scientifica, 1996 (con C.Bussolati e V.Chiesa), *Accesso a database via web*, Apogeo, 2001 e *Introduzione ai sistemi informatici*, McGraw-Hill, 2002<sup>2</sup> (con G.Buonanno, W.Fornaciari e D.Sciuto).

## INDICE

11	Prefazione di <i>Savina Raynaud</i>
19	Introduzione
23	Informazione? Alcune ipotesi
PARTE PRIMA. INFORMAZIONE	
33	CAPITOLO PRIMO
	Qual è il problema?
33	Un esempio: lampioni e semafori
35	Un racconto: all'origine dell'informazione
41	CAPITOLO SECONDO
	Le relazioni di sostituibilità funzionale e di identificazione
44	La compatibilità di sostituibilità e identificazione
48	Il problema della (non) simmetria e della (non) transitività della sostituibilità
51	CAPITOLO TERZO
	Informazione
54	Ancora l'esempio
56	Ancora sulla non transitività della sostituibilità
59	CAPITOLO QUARTO
	La relazione tra materia/energia e informazione
61	La replica del supporto
65	Un inserto epistemologico
67	Informazione e incertezza: un ruolo per la soggettività
69	CAPITOLO QUINTO
	Una caratterizzazione quantitativa dell'informazione
75	Bit <sub>1</sub> e bit <sub>m</sub>
76	Ridondanza e compressione

- 81    **CAPITOLO SESTO**  
      La relazione tra materia/energia e informazione: i limiti  
      fondamentali
- 85    Appendice 1: Un esempio di compressione per un supporto replicato
- 88    Appendice 2: Un esempio di applicazione dei limiti fondamentali

**PARTE SECONDA. (ANALOGICO E) DIGITALE**

- 93    **CAPITOLO SETTIMO**  
      Informazione: non solo molteplicità
- 97    Digitale e analogico?
- 99    **CAPITOLO OTTAVO**  
      Informazione: non solo identificazione
- 101   Due strategie di soluzione
- 104   Un esempio
- 107   **CAPITOLO NONO**  
      Analogico e digitale
- 110   Un inserto epistemologico
- 113   Due estensioni
- 116   Qualche riflessione
- 119   Sul «significato tecnologico» di analogico e digitale
- 125   **CAPITOLO DECIMO**  
      Perché il digitale oggi, dunque?
- 129   Appendice 1: Considerazioni sul problema generale della misurazione
- 133   Appendice 2: Il problema della qualità della conversione analogico-  
      digitale

**PARTE TERZA. (MEDIALITÀ E) MULTIMEDIALITÀ**

- 139   **CAPITOLO UNDICESIMO**  
      Media
- 140   (Multi)medialità?
- 145   **CAPITOLO DODICESIMO**  
      I processi di corrispondenza come media
- 147   Un inserto epistemologico
- 151   **CAPITOLO TREDICESIMO**  
      Il riconoscimento di configurazioni
- 156   Ancora sul ruolo dei supporti nei processi di corrispondenza
- 160   Processi di corrispondenza in più fasi: una conseguenza

- 165 CAPITOLO QUATTORDICESIMO  
Perché il multimediale oggi, dunque?  
169 Appendice: Considerazioni sulla strutturazione dell'informazione

#### PARTE QUARTA. GESTIRE INFORMAZIONE

- 175 CAPITOLO QUINDICESIMO  
Trasformazione di supporti e trattamento di entità di  
informazione  
177 Le operazioni di trasformazione e di trattamento e le loro relazioni  
179 Un inserto epistemologico
- 181 CAPITOLO SEDICESIMO  
Trattamento manuale e trattamento automatico  
dell'informazione  
187 I sistemi a comportamento dipendente dalle condizioni dell'ambiente  
188 Sistemi dedicati e sistemi programmabili per il trattamento automatico  
dell'informazione  
192 La codifica delle istruzioni: un'implicazione
- 195 CAPITOLO DICIASSETTESIMO  
Gestire informazione in forma digitale e multimediale:  
qualche riflessione
- 205 Qualche riferimento bibliografico



## PREFAZIONE

di Savina Raynaud

Ho visto crescere questo libro, settimana dopo settimana, dopo averne ascoltato il nucleo, in un giovedì pomeriggio di due anni fa, in una delle relazioni del Seminario di scienze del linguaggio dell'Università in cui Luca Mari insegna Fondamenti di Informatica 2, e io Filosofia del linguaggio.

Riepilogando i lavori del Seminario in quell'anno accademico, l'area tematica in cui mi parve più naturale inserirlo fu quella dell'analisi semantica: il suo intervento infatti era tutto mirato a scandire il significato di «digitale» e del suo opposto, «analogico», a partire da una constatazione – quella del dilatarsi progressivo della consapevolezza di tale significato – e da una ribellione, di fronte alla prospettiva di un mero supino prender atto di un uso tanto sregolato, confuso, vagamente conformistico del termine.

In entrambi questi atteggiamenti, la cura dell'osservazione, della rilevazione attenta e spregiudicata da un lato, e la determinazione ferma nel non arrendersi all'ottusità – e talora all'ostilità – dei fatti, trovo una costante del modo di lavorare dell'autore delle pagine che seguono; pagine che scaturiscono tanto dalla volontà di garantire un fondamento solido a uno dei propri campi di studio e di insegnamento, quanto dal compiacimento di contribuire a fare partecipe chi lo desidera del nitore, del rigore e del di più di comprensione che proviene da un'analisi che dai livelli terminologici risale a quelli contenutistici senza sforzo apparente, anzi con accresciuta intrinseca soddisfazione.

Soddisfazione che, anziché appagarsi dei risultati ottenuti, si è aperta a un metodico, pazientissimo lavoro di confronto: set-

timana dopo settimana, per un anno e più, dribblando i tanti ostacoli derivanti dai diversi impegni di ciascuno, abbiamo discusso – l'autore e una piccola squadra filosofica – capitolo dopo capitolo, paragrafo dopo paragrafo, grafo dopo grafo. Ed ecco, dopo un certo tempo, il file allegato ai vari messaggi di posta elettronica cambia supporto, e diventa ora un volumetto licenziato alle stampe.

L'autore, come è canonico, porta integrali la responsabilità e il merito di quanto vi è scritto. Ma chi ha già letto, e ascoltato, ciò che vi è scritto desidera testimoniare il benefico effetto di quel lavoro comune: spiegazioni ricevute, osservazioni accolte, domande prese sul serio e risposte non improvvisate hanno costruito – gradualmente e quasi impercettibilmente – un ponte tra cultura umanistica e cultura scientifico-tecnologica – i nostri rispettivi ambiti di appartenenza – agevolmente percorso in entrambe le sue direzioni. Più ancora, quel lavoro condiviso ci ha lasciato il gusto delle genuine, pur se piccole vittorie: vittorie sulla rassegnazione alla frammentarietà dei saperi, alla reciproca incomprendione, all'invalidità delle specializzazioni e a un destino – di noi non tecnologi né scienziati – di utenti di tecnologie *user friendly* (loro, sì) ma incapaci, noi, di suscitare analoghe corrispondenze d'amicizia nei confronti loro e dei loro mondi di provenienza.

Ulteriore confidenza nel possibile e lungimirante superamento di tanta rassegnazione ho tratto, in tempi più recenti, dalla lettura di opere per certi aspetti in sintonia con la presente<sup>1</sup>. Testimonianze entrambe di come intere vite dedicate professionalmente alle tecnologie dell'informazione e della comunicazione, lungi dal chiudersi in un'orgogliosa fierezza per i traguardi – non certo trascurabili – raggiunti, coltivino il desiderio, l'esigenza di confrontare uomini e macchine, l'intelligenza degli uni con le prestazioni delle altre, di interro-

---

<sup>1</sup> *Homo technologicus* di Giuseppe O. Longo, Meltemi, Roma 2001 e *Dal computer agli angeli. Milleduecentosessantuno momenti di pensiero su come dopo 60 anni di avanguardia nell'informatica testuale io inquadri le reti elettroniche entro quelle degli spazi della vita*, di R. Busa S.J., Itacalibri BVE, Ravenna-Milano 2000; cfr. anche le conclusioni di G. Peruzzi nella *Presentazione* del quaderno n. 121 de «Le scienze» (settembre 2001) dedicato a *Il futuro del computer*.

garsi sul loro rapporto, mettendo in questione tradizione e prevedibili sviluppi.

Proprio questa capacità, di mettere in questione tradizioni importanti per favorirne un'integrazione feconda anziché contribuire a perpetuarne la mutua estraneità, muove osservazioni, proposte, interrogativi che dalle *humanities* vengono rivolte alle *computer sciences*, così come dall'interno di queste si indirizzano a «tutta l'attività mentale dell'uomo» come a termine adeguato di confronto. Ecco allora che «colui che è riconosciuto universalmente come il pioniere dell'informatica linguistica», P. Busa,<sup>2</sup> conclusivamente scrive: «Ogni giorno di più mi rendo conto che le nostre conoscenze attuali di morfologia, sintassi e lessico hanno bisogno di essere studiate e ridefinite per uso di computer, prima che di continuare a venir usate come sufficienti per esso».<sup>3</sup> E uno studioso e docente di teoria dell'informazione del valore di Giuseppe Longo punteggia l'ultimo suo volume di così acuti e severi pronunciamenti antiriduzionistici che il lettore, più che con un uomo di scienza, alla fine ha l'impressione di essersi intrattenuto con un presago scrutatore di nuovi mondi e nuovi metodi, capaci di restituirci quella complessità che stoltamente soffriamo come un peso più di quanto non ne apprezziamo la ricchezza. «Nell'uomo ci sono due modalità gnoseologiche, da una parte gli affaccendati e inconsapevoli meccanismi del corpo, il lavoro delle cellule, dei neuroni, degli organi; dall'altra la conoscenza alta, razionale, di cui abbiamo esperienza consapevole e che in fasi recenti dell'evoluzione abbiamo cominciato a esprimere prima attraverso la lingua, poi attraverso altri sistemi simbolici via via più univoci e precisi, fino a giungere alle formule rigorose della matematica. Questo percorso riflette bene il lungo tentativo della scienza occidentale di trasferire le conoscenze dalla modalità biologica incarnata nel corpo a quella razionale, disincarnata e (quasi) distaccata dal mondo [...]. Il formalismo è andato di pari passo con la convinzione che non esistano forme di conoscenza diverse da quelle di tipo fisico-matematico [...]. Ma questo programma [...] trovò una barriera insormontabile prima nei paradossi logici e poi nei

<sup>2</sup> Appendice 2000 all'*Enciclopedia Treccani*.

<sup>3</sup> Pensiero 1151 del volume citato.

teoremi di limitazione di Gödel. [...] Ci si dovette arrendere all'evidenza: anche il discorso più coerente e univoco si nutre e s'intorbida dell'ambiguità che promana dal mondo attraverso il linguaggio ordinario e che contamina tutti i linguaggi simbolici da esso distillati. [...] Si delinea dunque, e non solo per una pressione esterna, ma anche per gli sviluppi interni della scienza, il fallimento del progetto di formalizzazione coerente e totale: se questo progetto non può riuscire nella matematica, che è l'attività umana più lontana (ma non separabile) dal mondo, è lecito nutrire dubbi molto seri che possa riuscire altrove. In particolare perché possa riuscire in Intelligenza Artificiale dovrebbe riuscire in tutti i domini, perché l'IA pretende di descrivere tutto mediante algoritmi: come si vede si tratta di un'impresa temeraria, e non è un caso che le ricerche in questo campo stiano subendo una svolta importante, che le porta a impostazioni di tipo evolutivo».<sup>4</sup>

Dunque dalle pagine di questi testimoni-coartefici, in prima persona, della «rivoluzione informatica» che ha segnato il secolo appena compiuto emerge vigorosamente l'orientamento al futuro di cui è prego il presente. Ma si tratta di un orientamento non univoco, necessitato.

Ecco che allora, per meglio affinare diagnosi e prognosi dello stato presente, si fanno preziosi lavori – come quello qui pubblicato – tesi a fondare e vagliare tale stato presente: su base semiotica ed epistemologica. La semiosi è così connaturata alla creatura umana che è difficile sopravvalutarne l'incidenza. Continuo a ritenere meritevole di qualche meditazione il fatto che due autori che hanno contribuito in misura non certo secondaria allo sviluppo della logica, Peirce e Frege, abbiano lasciato tracce ancora più vistose nella storia del pensiero nel loro ruolo di fondatori, rispettivamente, della semiotica e semantica contemporanea. Il nostro pensiero non vive allo stato puro, ma è elaborato in forma segnica, e si comunica per il tramite di entità corporee, animate o no.

Dunque, occuparsi di afferrare il valore semantico di espressioni come «digitale», «informazione», «medialità» vuol dire non lasciarsi portare da parole d'ordine per essere ammessi in un

---

<sup>4</sup> G. O. Longo, op. cit., pp. 93-94.

sistema, ma acquisirle come parole-chiave per entrarvi con maggiore consapevolezza, con maggiore libertà.

Sceverare con cura entro l'area a prima vista nebulosa dei segni verbali il permanere dei significanti e le trasformazioni dei significati, oltre che gli effetti «metabolizzanti» dei legami sintattici e, ultimamente, dei contesti è un modo serio di non «ingessare» indebitamente le articolazioni linguistiche e il loro funzionamento nel tempo. Un modo di evitare associazioni riduttive o restrizioni arbitrarie. Quanti, e non solo studenti, della nuova classe delle lauree in scienze della comunicazione restringono l'accezione delle nozioni di informazione e di comunicazione all'area delle cosiddette comunicazioni di massa, quasi esistessero due separate «teorie dell'informazione e della comunicazione», con le rispettive tecnologie/tecniche? Quasi si trattasse di pure omonimie, casuali e forse fastidiose, per denominare mondi tra loro lontani? O, al più, si evocassero paradigmi contrapposti e inconciliabili, quello «lineare» di Shannon e Weaver da un lato rispetto a quello «polifonico» di Bateson, Watzlawick e Beavin dall'altro? Quanti studenti delle discipline scientifiche e tecnologiche inerenti l'informazione e la comunicazione non immaginano la prossimità delle loro competenze all'antropologia, alla logica e alle scienze del linguaggio e cognitive?

Il contributo racchiuso nelle pagine che seguono discende dalla volontà di andare ai fondamenti, avendo cura di caratterizzare l'epistemologia dei percorsi a volta a volta esaminati. Il soggetto umano nella sua natura e nella sua operosità culturale ne emerge quale attore protagonista, eppure immerso nella materia/energia, di essa stessa peraltro costituito. Dicevamo del buon effetto di un'analisi semantica congrua, consistente nell'evitare associazioni riduttive al presentarsi di espressioni cruciali. Quanto più agile può farsi l'intelligenza degli sviluppi tecnologici stessi, perfino per un profano, quando si sappiano rinfrancare nodi eccessivamente lassi o scioglierne di indebitamente intricati tra nozioni come quelle tra calcolatore e numeri<sup>5</sup>, tra determinazioni degli stessi calcolatori come elettronici o

---

<sup>5</sup> Sul ruolo della formalizzazione, fra le mille indicazioni bibliografiche possibili, rinvio ancora al già citato volume di G. O. Longo, alle pp. 57-59, 95-104, 108-113.

quantistici o «alle proteine»<sup>6</sup>, tra dimensioni dai confini relativamente mobili come *hardware* e *software*<sup>7</sup>!

Ma ogni impegno volto ad apprezzare l'intelligibilità di questi mondi trova un deterrente formidabile in due «vizi» che ci affliggono più di quanto forse non pensiamo: la pigrizia e la paura del nuovo da un lato, con le loro interne correlazioni e retroazioni, il cinismo pragmatico e ostile al momento fondativo della teoria, dall'altro.

A parere di chi scrive, invece, il dedicare qualche tempo a indagare il filo sottile ma resistente che lega una nozione come quella attuale di informazione a quella antica, filosofica e non, di forma, e che lega tra loro l'odierna realtà virtuale e l'aristotelica potenza dell'atto, non solo ci aiuta a comprendere il nesso tra passato e presente, comprensione sempre benefica per il nostro stare al mondo. Ci aiuta anche ad orientare le nostre decisioni future, restituendo unità a campi così solidamente distinti nella *communis opinio* (e non solo), da apparire nettamente separati: quello delle scienze medico-biologiche – e della genetica in particolare – in ordine al patrimonio informazionale dei viventi<sup>8</sup> e quello delle tecnologie grazie alle quali il computer è divenuto per noi, cioè almeno per una certa porzione di mondo, un oggetto familiare, quasi inseparabile dalla nostra vita.

---

<sup>6</sup> Cfr., nel già citato quaderno de «Le scienze» del settembre 2001, gli scenari presentati da Seth Lloyd, Robert B. Birge, Mark A. Reed e James M. Tour.

<sup>7</sup> Cfr. G. O. Longo, op. cit., pp. 65-66.

<sup>8</sup> Mi limito a citare F. J. Dyson, *Origini della vita*, Bollati Boringhieri, Torino 2002<sup>2</sup> (la prima edizione è del 1985), in particolare le pagine dedicate a Schrödinger e von Neumann; e G. Monastra, *Le origini della vita*, Il Cerchio - Itaca libri, Rimini-Ravenna 2000.

Penso ai due talenti di pascaliana memoria, all'*esprit de finesse* non disgiunto da quell'*esprit géométrique* che egli stesso seppe coltivare nella sua personale e professionale esistenza.

E auguro a chi si inoltra nella lettura delle pagine scritte da Luca Mari di lasciarsi conquistare dal fascino di questa unificante coltivazione.



## INTRODUZIONE

Questo libro ha una storia un po' *sui generis*, come tale è l'argomento che esso tratta. La vicenda è soggettiva, e nondimeno mi sembra che meriti il breve tempo che la sua lettura richiede.

Negli ultimi 5 anni mi sono trovato a insegnare argomenti assai simili a persone assai diverse per basi culturali e interessi, e in particolare a studenti universitari di facoltà di Economia Aziendale, di Ingegneria e di Lingue e Letterature Straniere, a studenti di Liceo Classico e Scientifico, a insegnanti di scuole superiori. Questa anomalia – il fatto di proporre temi analoghi in contesti così disomogenei non è certo tipico dalle nostre parti – ha un'origine contingente: il «fenomeno World Wide Web» ha sorpreso tutti e colto molti non attrezzati di adeguate chiavi di interpretazione, con ciò creando interessanti trasversalità nel tentativo di *capire*.

Nelle sue prime fasi di sviluppo, diciamo fino al 1996 se occorre indicare una data, Web veniva naturalmente considerato soprattutto come un'entità *tecnologica*, e come tale era oggetto di lavoro e studio da parte di (relativamente poche) persone attrezzate di competenze operative a riguardo di strumenti come TCP/IP, HTTP e HTML, vecchi e (per quegli anni) nuovi attrezzi del mestiere degli informatici e per gli informatici. È chiaro che Web è, e rimane, un'entità tecnologica, come lo sono gli altri servizi applicativi di Internet come l'email, Telnet, FTP, ... Ma a Web è successo quello che accade a ogni tecnologia che raggiunge il *successo sociale*: si è creato un circolo virtuoso, per cui trovandolo utile e sufficientemente facile da usare molte persone hanno cominciato a usarlo, e quanto maggiore è stato il numero dei suoi utenti tanto maggiori sono stati gli investimenti

per renderlo utile e facile da usare. Diffondendosi, Web ha creato le condizioni per diffondersi ulteriormente.

Oggi ci si può servire appropriatamente di Web, e di Internet più in generale, con poco più che una certa manualità nell'impiego di un personal computer: eppure se il *saper fare* è stato in larga misura soddisfatto il *sapere* è ancora aperto.

I corsi universitari, i cicli di seminari, le lezioni in corsi di aggiornamento, le conferenze che ho avuto l'opportunità di tenere in questi ultimi anni avevano questo tentativo di comprensione come filo conduttore comune, e come domanda emergente – siamo stati davvero tutti sorpresi dall'impetuosità del fenomeno – *la ricerca delle ragioni effettive della novità* di Web.

Credo utile, a questo proposito, una semplice considerazione comparativa con l'email; anch'essa, e in effetti probabilmente ancor più di Web, ha avuto una notevole diffusione sociale, e anch'essa si è diffusa in quanto servizio applicativo di quella infrastruttura tecnologica che è Internet. Le analisi relative all'uso, attuale e potenziale, della posta elettronica si concentrano su questioni di *efficienza*: i cambiamenti che l'email ha prodotto nelle modalità di comunicazione interpersonale hanno avuto, almeno inizialmente, un'origine quantitativa piuttosto che qualitativa. Non così è successo per Web, il cui emergere ha evocato scenari radicalmente *nuovi*, nei quali la borghesiana biblioteca universale si coniuga con il mito dell'accessibilità globale, in lettura ma anche in scrittura: tutto ciò che è stato pubblicato è accessibile, e tutto ciò che viene scritto può essere pubblicato.

Ecco perché Web ha sollecitato legittimi interessi e curiosità che, al di là di questioni strumentali, mirano a investigare la sua (eventuale) *paradigmaticità*. Ma Web è paradigma di che? Tra le possibili risposte, complementari più che alternative, che possono essere date a questa domanda, alcune mi sembrano sufficientemente esplorate e chiarite nel loro significato; penso in particolare alla connotazione di Web in quanto sistema *ipertestuale* e *interattivo*. Ma che dire, per esempio, del suo essere *digitale*? Si tratta di una caratteristica citata, a proposito e a sproposito, assai ampiamente, ma spesso – mi sembra – senza una sufficiente attenzione a mantenere il discorso su argomenti solidi (confesso che ho spesso l'irrefrenabile tentazione di qualificare

molti usi di «digitale» come *vaporware*: fumo senza arrosto). Ecco alcuni tra i miei riferimenti preferiti (con la scusa che riporto le citazioni che seguono in un'Introduzione mi permetto di non dichiararne gli autori: parlo così del (l'eventuale) peccato ma non del peccatore):

- «'digitale': che opera su dati rappresentati come serie di unità binarie o in analoghe forme discrete»: *digitale è sinonimo di discreto?*
- «ci occuperemo qui di oggetti di informazione digitali, che pongono i problemi più interessanti, sebbene gli oggetti analogici, inclusi i libri tradizionali, quasi certamente rimarranno parte fondamentale di tutte le biblioteche»: (*posto che i «libri tradizionali» sarebbero analogici*) *digitale è sinonimo di basato su strumenti informatici?*
- «abbiamo a che fare con due tipi di lingue: l'una, quella per esempio in cui è formulata questa frase, dà delle definizioni, è obiettiva, cerebrale, logica, analitica; è la lingua della ragione, della scienza, dell'interpretazione e della spiegazione. L'altra è molto più difficile da definire, appunto perché non è la lingua della definizione; la si potrebbe chiamare la lingua dell'immagine, della metafora, della pars pro toto, forse del simbolo, in ogni caso comunque della totalità»: (*posto che le due «lingue» di cui si parla sarebbero quella digitale e quella analogica rispettivamente*) *digitale è sinonimo di analitico?*
- «i segnali digitali sono quei segnali che si manifestano attraverso la digitazione di numeri o codici e che ad ognuno di essi corrisponde dei segnali specifici. Quindi ad esempio il telefono è uno strumento digitale perché componendo un numero si ottiene di telefonare a una data persona. Segnali analogici invece sono quei segnali che usano delle frequenze e che per trovare quelle frequenze bisogna scandagliare tutto il raggio di azione di esse. Un esempio di segnale analogico sono le frequenze della radio infatti bisogna scandagliare una determinata frequenza per trovare la stazione scelta. Le differenze sono che una ha subito la risposta in base a ciò che digitiamo (digitale) e l'altra invece ha bisogno di scandagliare il campo d'onda per trovare ciò che vogliamo (analogico)»: (*dovuto a uno studente universitario: il non proprio perfetto*)

*italiano è dovuto a tale Anonimo, e non è da imputare a disattenzione del correttore di bozze...): digitale come sinonimo di caratteristica misteriosa e comunque indicibile?*

Questo libro propone un *framework concettuale* in cui il digitale e il multimediale (quanto esemplificato sopra per il primo avrebbe potuto essere esteso anche al secondo, con considerazioni altrettanto sconfortanti) vengono presentati come possibili *caratteristiche qualificanti della relazione tra mondo fisico e mondo dell'informazione*. È un tentativo di sintesi delle numerose discussioni che in questi anni su questi temi ho avuto con amici e colleghi; avendoli tanto tormentati con le mie richieste e sollecitazioni, è ora un vero piacere riconoscere il loro contributo di competenza e di pazienza.

Ringrazio perciò Giacomo Buonanno, Piero Cavaleri, Paolo Faverio, Aldo Frigerio, Fabio Massari, Jennifer Moro, Marco Padula, Federico Pigni, Aurelio Ravarini, Savina Raynaud (anche per la sua preziosa Prefazione!), Paola Saporiti, Giuseppe Scifo, Donatella Sciuto, Daniele Spinelli, Marco Tagliavini, Andrea Taroni, nonché i vari studenti dell'Università Cattaneo di Castellanza, dell'Università Cattolica di Milano e del Liceo «Sacro Monte» di Varese che hanno sperimentato, nel ruolo delle cavie, parti di questo percorso.

Lucia, Davide, Sofia e Chiara hanno *vissuto* questo lavoro sperimentando un marito e un padre un po' meno presente di quanto avrebbe potuto, appunto perché impegnato a leggere, pensare e scrivere: questo libro è dedicato, con affetto, a loro.

Maggio 2002

Un curioso destino attende spesso quei termini tecnici che, a causa di un successo inaspettato, si ritrovano utilizzati anche al di fuori del loro contesto originario. In particolare se il loro significato non rinvia a entità concrete, essi rischiano di perdere rapidamente qualsiasi valore semantico specifico, come se esistesse un «principio di conservazione della quantità di significato», per cui quanto più ampiamente un termine è utilizzato tanto meno definito può essere il suo significato.

Non è difficile costatare che in questa situazione si trovano alcuni dei termini attualmente considerati caratterizzanti delle scienze e delle tecnologie dell'informazione: digitale, interattivo, ipertestuale, multimediale, programmabile, virtuale, ... L'indicatore più evidente della crisi di significato di questi aggettivi è appunto la completa diversificazione dei sostantivi a cui vengono applicati. Possibile, per esempio, che «digitali» possano essere, propriamente, sistemi, linee di trasmissione, memorie, display, formati, codici, linguaggi, tecnologie, modalità di elaborazione, dati, informazione, ..., ma poi anche mercati, capitalismi, ere, società e culture, ...? Cosa possono avere in comune entità così diverse per il fatto di essere, appunto, digitali? E quindi, in definitiva: esiste (ancora) un (solo) significato di «digitale»?

Nel loro sempre più tipico impiego di elementi di scelta tra alternative (digitale invece di analogico, multimediale invece di unimediale, ...), questi termini tendono piuttosto a diventare semplicemente simboli, che rinviano in definitiva a opposizioni quanto mai generiche quali nuovo-vecchio, interessante-irrelevante, utile-inutile, ... In questo modo si completa la transizione, e dall'originaria accezione tecnica si giunge a quegli strabilianti svuotamenti semantici (o, per essere più ottimisti, a

quelle ardite metafore) che consentono di parlare di «società digitale», «formato interattivo», «tecnologia ipertestuale», e simili.

Naturalmente non si sta obiettando alla scelta di usare dei termini in modo non conforme ai dizionari (questione comunque non del tutto irrilevante per chi continui a porsi l'obiettivo di farsi capire quando si esprime); ci si sta chiedendo piuttosto se, ancora a titolo di esempio, parlando di «società digitale» si riesca a comunicare un contenuto diverso da, e più specifico di, «società attuale», o qualcosa di simile ma comunque non meglio qualificato. Forse che con la locuzione «società digitale» si dovrebbe intendere in effetti «società in cui i calcolatori hanno un ruolo rilevante»? Se questo fosse il caso, indubbiamente la prima dizione si presenterebbe ben più elegante, se non altro perché più «culturale» e meno «tecnocratica», di quest'ultima, ma all'impiego di «digitale» resterebbe riservata davvero solo una funzione di rinvio allusivo.

Non si tratta, ci sembra, di questioni particolarmente frequentate nella letteratura tecnica delle scienze e delle tecnologie dell'informazione, e ciò per una ragione ben plausibile: come accade per molti campi della scienza, anch'esse dispongono di un nucleo di conoscenze considerate consolidate e stabili, che fornisce il lessico e la modellistica di contesto necessari alla ricerca e allo sviluppo. Un lavoro di analisi di tali basi concettuali, che stanno «a monte» del nucleo, viene dunque generalmente inteso come una diversione dagli obiettivi effettivi dell'attività di ricerca, che si svolge invece «a valle» del nucleo. Anche l'attenzione didattica sul tema dei fondamenti è solitamente ridotta, e sovente limitata ad assicurare quelle generali (o generiche?) pre-comprensioni ritenute necessarie per l'avanzamento degli studi (quanti corsi di fisica, per citare un esempio da un altro settore disciplinare, vengono introdotti da una discussione appropriata relativa alla natura delle grandezze fisiche?).

Il tema che qui poniamo all'attenzione attiene dunque ai *fondamenti delle scienze e delle tecnologie dell'informazione*. Se lo giudichiamo cruciale oggi è però per ragioni che sono solo in parte interne alle scienze e alle tecnologie dell'informazione in quanto tali.

In primo luogo, la breve storia di tali discipline non ha ancora consentito la sedimentazione spontanea di uno strato di fondamenti concettuali sufficientemente solido da poter reggere senza cure specifiche un edificio che, come quello dell'informatica, viene attualmente costruito con straordinari ritmi di crescita. Ancora a mo' di esempio, l'accezione di «digitale» che si rintraccia abitualmente sui dizionari («rappresentato in forma discreta», o qualcosa di simile) risulta inadeguata, anche a una semplice analisi, a spiegare l'attuale enfasi verso il digitale stesso. Quale novità potrebbe essere riconosciuta in una rappresentazione, quella appunto mediante elementi discreti, che ha un suo prototipo nel conteggio mediante sassolini (i *calculi* latini)?

Questa debolezza inerente è stata inoltre accentuata dal fatto che termini come «digitale» o «multimediale» sono ormai patrimonio del linguaggio quotidiano e quindi, come abbiamo considerato, corrono il rischio di una progressiva e rapida diluizione del loro significato.

Un tentativo di chiarimento al riguardo è dunque oggi compito imprescindibile per chi si interessi di fondamenti delle scienze e delle tecnologie dell'informazione: un tentativo che ha ormai sostituito la sua originaria dimensione tecnica con una ben più ampia, ramificata e complessa connotazione culturale. È questa l'ipotesi generale da cui prendono le mosse le pagine che seguono, rivolte anche, se non soprattutto, a coloro che non dispongono delle competenze tecniche usualmente considerate caratteristiche delle scienze e delle tecnologie dell'informazione, ma che non rifuggono da qualche riflessione sulle basi concettuali delle stesse.

La rilevante polisemia del concetto di informazione, intorno al quale si svilupperà il discorso che stiamo per cominciare, rende critica la necessità di qualche preliminare chiarimento (data la complessità del tema dovremmo dire: di qualche preliminare *tentativo* di chiarimento) al riguardo. L'ambiguità fondamentale che l'uso di questo concetto porta con sé è dovuta al fatto che di informazione si parla in riferimento sia alle *attività* finalizzate

all'essere informati sia al *contenuto* e al *prodotto* di tali attività. «Informazione» è:

- sia il termine per un'azione (un *nomen actionis*), come nel caso della locuzione «i lavoratori dell'informazione» impiegata per riferirsi ai giornalisti e alludendo alle attività che essi compiono,
- sia il termine per il risultato di un'azione (un *nomen rei actae*), come è tipico nelle sue molteplici occorrenze in quanto oggetto dei predicati elaborare, memorizzare, trasmettere, acquisire, ...

Proprio la constatazione che l'informazione possa essere oggetto di attività diverse giustifica l'ipotesi che intende il secondo significato come concettualmente antecedente rispetto al primo: è perciò che all'*informazione come oggetto* sono dedicate le prime tre Parti di questo lavoro. Dopo aver esplorato il «che cosa», nella quarta e ultima Parte verranno finalmente discussi alcuni aspetti del «come», cioè dell'*informazione come azione*.

Ma anche il significato specifico di informazione come *nomen rei actae* è, nei fatti, ambiguo (e dunque non così specifico...). Un caso: mettendosi in ascolto di una trasmissione radiofonica in lingua cinese una persona che non comprende la lingua cinese ottiene con ciò informazione? Due plausibili risposte: secondo un tecnico delle telecomunicazioni, sì; secondo il direttore dell'emittente radiofonica, no. La ragione di questa differenza è riconducibile al fatto che dal punto di vista del tecnico l'informazione corrisponde al *dato* che l'ascoltatore è comunque in grado di ricevere correttamente la trasmissione, mentre per il direttore ciò non è sufficiente; egli sostiene che è stata trasmessa informazione solo se l'ascoltatore è in grado di interpretare il dato, cioè solo se al dato viene associato un *significato*. Proprio l'ascoltatore potrebbe fornire infine una terza risposta alla domanda precedente, sostenendo che la trasmissione porta effettivamente informazione solo se i suoi contenuti sono, soggettivamente, di *interesse*.

Queste risposte sono esemplificative dei tre livelli a cui si può trattare l'informazione:

- *informazione come dato*, cioè informazione *sintattica*, che tiene in considerazione i segni impiegati e le loro relazioni reciproche;
- *informazione come dato dotato di significato*, cioè informazione *semantica*, che tiene in considerazione non solo gli aspetti sintattici ma anche ciò a cui i segni si riferiscono, e quindi i loro significati;
- *informazione come dato dotato di significato e di valore*, cioè informazione *pragmatica*, che tiene in considerazione non solo gli aspetti sintattici e semantici ma anche i soggetti coinvolti, e quindi questioni legate a comportamenti, interessi, utilità, ...

La ragionevole corrispondenza: accezione sintattica=problemi formali e tecnici; accezione pragmatica=problemi psicologici, sociologici, ..., affiancata a una irragionevole separazione culturale tra «mondo tecnico-scientifico» e «mondo umanistico», ha fatto sì che trattare oggi di problemi culturali dell'informazione sia considerato pressoché sinonimico di occuparsi di etica del giornalismo, o semiotica del cinema, o simili. Con la conseguenza sfortunata che per mancanza di interesse, tempo, competenze, le basi formali e tecniche degli argomenti vengono trascurate e rimangono, al più, in un tacito sottofondo. È certo comprensibile che chi oggi intenda occuparsi di sociologia della comunicazione radiofonica scelga di mantenere in secondo piano, e di fatto di escludere, dal suo lavoro i dettagli sulle caratteristiche tecnologiche del medium: si tratta infatti di nozioni ormai talmente consolidate (la valutazione della larghezza di banda del canale, le diverse tecniche di modulazione dei segnali, ...) da avere un impatto davvero scarso sull'oggetto specifico del lavoro.

La possibilità di disinteressarsi di ciò che sta *dentro la scatola* è tipica del raggiunto successo sociale di una tecnologia: si possono probabilmente studiare le condizioni di impiego di un trapano elettrico o di un'automobile anche senza disporre delle competenze tecniche relative alle loro modalità di funzionamento. Facendo appunto riferimento alla metafora della *scatola nera*, che proprio perché nera, e quindi opaca, nasconde il suo contenuto una volta che il suo coperchio sia stato chiuso, si può

ipotizzare che in molti casi l'analisi delle caratteristiche di una tecnologia e del suo impatto sociale possa essere compiuta «a scatola chiusa». Il fatto è però che le tecnologie a cui si allude abitualmente quando si impiegano i termini «digitale», «multimediale», ... sono *nuove*, e ciò non solo per un fatto meramente cronologico. Questa novità non consente ancora (questo a nostro giudizio, ben inteso!) di chiudere definitivamente la scatola nera dell'oggetto tecnologico, nemmeno per chi se ne interessi in prospettiva psico-sociologica.

In un quadro di tale complessità, e pure consapevoli dei limiti propri di una schematizzazione, riteniamo opportuno orizzontare chi vorrà accompagnarci nel percorso che qui comincia, dichiarando alcuni degli assunti di base di questo lavoro.

1. Ipotesi della distinzione tra mondo fisico e mondo dell'informazione e della necessità della loro interrelazione:  
*l'informazione non è parte del mondo fisico, ma ogni operazione di gestione dell'informazione richiede un supporto fisico; la relazione tra mondo fisico e mondo dell'informazione è dunque cruciale.*
2. Ipotesi dell'esistenza di informazione non-pragmatica:  
spesso, nel linguaggio comune e non solo, si parla di informazione come un prodotto della comunicazione intenzionale tra esseri umani; senza escludere questa accezione, adotteremo qui una prospettiva più ampia, ipotizzando che *informazione possa essere ottenuta anche dall'osservazione di sistemi fisici.*
3. Ipotesi dell'esistenza di informazione non-semanticale:  
spesso, nel linguaggio comune e non solo, si parla di informazione come risultato della condivisione di significati; senza negare questa accezione, adotteremo qui una prospettiva più ampia, ipotizzando che *informazione possa essere portata anche da sistemi considerati in termini solo formali.*

La prima di queste tre ipotesi merita, in particolare, una precisazione. Esistono insiemi di conoscenze, come la matematica e la logica, che sono interpretabili come indipendenti da qualsiasi riferimento al mondo fisico, e che pure attengono ad attività di

gestione dell'informazione. In queste pagine assumeremo un *punto di vista operativo*, finalizzato allo studio più delle relazioni tra mondo fisico e mondo dell'informazione che di un eventuale concetto di informazione «in sé». Questo ci consente di evitare di entrare in complesse, e controverse, discussioni su temi quali:

- l'eventuale «realtà in sé» di cose come i numeri («esiste il numero 2?»);
- la natura della mente e le sue relazioni con il cervello («qual è il ruolo della mente, e quale quello del cervello, quando si gestisce informazione, come si dice appunto, 'a mente'?»).

Le pagine che seguono nascono dunque da questa impostazione. Attrezzati con quanto avremo inizialmente raccolto riflettendo sul concetto di informazione, ci addentreremo nelle aree semantiche dei concetti di digitale e multimediale, e in un'esplorazione del significato di «gestione dell'informazione».

Una coppia di termini rimarrà, in modo costante ma tacito, nel sottofondo della nostra analisi: *hardware-software*. Molto di quanto c'è di interessante nel tema che trattiamo scaturisce dalla loro relazione, nella dialettica tra distinzione e complementarietà.



PARTE PRIMA  
INFORMAZIONE



## CAPITOLO PRIMO

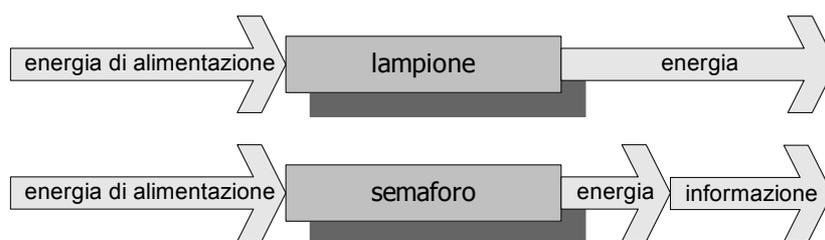
### QUAL È IL PROBLEMA?

Caratterizzare in modo appropriato un (il?) significato di «informazione» è un compito particolarmente complesso, non fosse altro per l'estrema diversificazione degli ambiti in cui il termine è variamente impiegato. Proviamo perciò ad avvicinarci all'argomento in modo allusivo, con un esempio prima e una specie di breve racconto poi, lasciando alle immagini il compito di accennare ai temi che in seguito tratteremo in forma più rigorosa.

#### *Un esempio: lampioni e semafori*

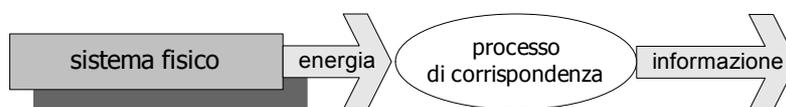
Al di là delle loro differenze materiali, cosa distingue un semaforo da un lampione? Con questa domanda entriamo, *in medias res*, nell'argomento del nostro lavoro.

La risposta si trova, naturalmente, nell'analisi delle caratteristiche *funzionali* dei due oggetti. I lampioni vengono costruiti per essere impiegati come sistemi di illuminazione, e raggiungono il loro scopo se operano efficientemente per convertire in luce la corrente elettrica che viene loro fornita: dunque essi trasformano energia in energia. D'altra parte, la funzione dei semafori è di segnalare le condizioni di transitabilità agli incroci stradali: anch'essi, come i lampioni, emettono luce, ma ciò è solo funzionale al raggiungimento della loro funzione. Pur mediato da energia, ciò che un semaforo produce non è energia (né materia, ovviamente...), ma un'entità *di un'altra natura*. Per brevità, e senza impegnarci ancora in un'analisi puntuale del significato di questo termine, chiamiamola *informazione*.



Questa distinzione attiene dunque non agli oggetti, lampioni e semafori, «in sé», ma al loro uso; e non è infatti difficile ipotizzare situazioni, forse anomale ma non implausibili, in cui le parti siano invertite: in assenza di fonti alternative, anche un semaforo potrebbe essere temporaneamente impiegato come strumento di illuminazione; d'altra parte, un lampione acceso potrebbe essere utilizzato per ottenere l'informazione che il sistema di erogazione di energia elettrica è in funzione.

La relazione, di uso dunque, tra energia e informazione può essere *solo convenzionale* (la luce rossa del semaforo identifica l'entità di informazione «non passare», ma avrebbe potuto essere il contrario) oppure può dipendere da un *processo inferenziale* (il fatto che il lampione acceso identifichi l'informazione «sistema elettrico funzionante» deriva dalla conoscenza sulle modalità di funzionamento dei lampioni e dei sistemi di trasporto di energia elettrica). In entrambi i casi si tratta di un *processo di corrispondenza* che, applicato a un sistema fisico che si manifesta in una sua configurazione, lo rende un *produttore di informazione*.



Traiamo da questo esempio alcune considerazioni preliminari, che ci accompagneranno per l'intero lavoro e che nel seguito svilupperemo progressivamente nel loro significato e nelle loro conseguenze:

- l'informazione non è un'entità parte del mondo fisico;
- l'informazione non è data in sé, ma deve essere portata da un sistema fisico;

- che un sistema fisico porti informazione non è caratteristica propria del sistema, ma dipende anche dall'impiego di un, più o meno convenzionale, processo di corrispondenza.

L'esame dell'insieme di queste tre entità, un sistema fisico, un processo di corrispondenza a esso applicato, l'informazione ottenuta, è l'oggetto primario di questo lavoro: chiameremo tale insieme *sistema informazionale* (l'aggettivo «informazionale», forse non usuale, è scelto consapevolmente, con l'accezione generale di «relativo all'informazione» e in quanto distinto da «informativo», che invece significa «che porta informazione»; solo incidentalmente notiamo che l'inglese, che usa direttamente il sostantivo in posizione aggettivale nella nota locuzione *information science*, offre una distinzione corrispondente: mentre l'aggettivo di *information* è *informational*, *informative* significa *giving information*).

Con ciò, il nostro problema di base, *cos'è «informazione»?*, rimane ancora largamente inesplorato.

#### *Un racconto: all'origine dell'informazione*

*(inframmezzate al racconto si trovano varie esemplificazioni e note, impaginate come questo paragrafo per evidenziare il fatto che si tratta di inserti e per facilitare la lettura continua del racconto)*

☞ In principio era la *materia/energia*. Ed essa si trasformava continuamente.



*Si tratta di assunzioni (l'esistenza di materia/energia e la sua dinamica) difficilmente evitabili!*

*Parliamo di materia/energia, senza distinguere tra queste e trattandole come fossero differenti manifestazioni costitutive del medesimo mondo fisico (in fondo è questo, qualitativamente, ciò che*

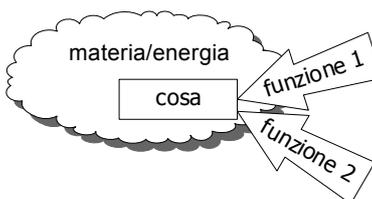
$E(\text{energia})=m(\text{massa}) \times c^2$  asserisce: energia e materia corrispondono, a meno di una costante).

✎ Poi venne la vita, e ogni essere vivente cominciò a usare la materia/energia, coscientemente o meno, per mantenere la propria esistenza. Parti spazio-temporali della materia/energia, che chiameremo per brevità *cose*, cominciarono dunque ad avere una *funzione*, non loro propria ma stabilita dagli esseri viventi che le usavano.



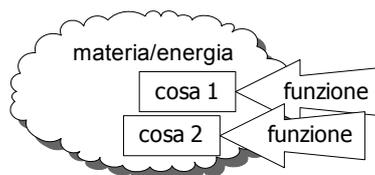
*Anche quella dell'esistenza di cose è un'assunzione irrinunciabile: il nostro stesso modo di conoscere è fondato sulla capacità di individuare cose rispetto all'ambiente in cui sono inserite. Non discutiamo se in questa attività di individuazione l'assegnazione di una funzione sia definitoria o a posteriori. Come le cose vengano individuate (e quindi cosa sia una cosa) è comunque un problema veramente complesso: nella loro natura di parti spazio-temporali della materia/energia, anche «questo tavolo alle 15:18» e «questo (stesso...) tavolo alle 15:19» potrebbero essere considerate cose diverse. J.L.Borges ha scritto su questo tema un bel racconto (un vero racconto...), il cui personaggio, Funes, è dotato di una memoria così prodigiosa da consentirgli di associare nomi sempre diversi a cose, nel senso appena considerato, diverse.*

✎ Le funzioni attribuibili a cose erano molte. E gli esseri viventi scoprirono che una stessa cosa poteva essere usata per funzioni diverse.



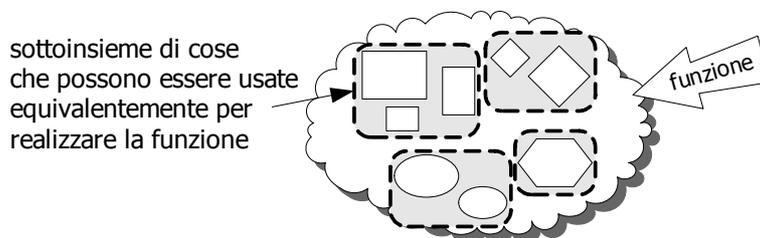
*Per esempio, uno stesso tavolo può essere usato come supporto per oggetti, come base su cui una persona può salire in piedi per raggiungere un oggetto posto in posizione elevata, come oggetto artistico, ...*

✎ Ma soprattutto gli esseri viventi scoprirono che più cose potevano essere usate per realizzare una stessa funzione, manifestandosi dunque come *equivalenti dal punto di vista della loro capacità di realizzazione di tale funzione*. Cose con questa caratteristica potevano essere sostituite l'una all'altra senza con ciò alterare le condizioni di realizzazione della funzione stessa.



*Per esempio, tavoli diversi possono essere usati come equivalenti l'uno con l'altro in quanto supporti per oggetti, se tutti hanno un piano con la stessa superficie e la loro tenuta al carico è la stessa.*

✎ Ciò che gli esseri viventi impararono fu dunque che, per una certa funzione, un insieme di cose poteva essere ripartito in sottoinsiemi, ognuno costituito dalle cose utilizzabili equivalentemente dal punto di vista della realizzazione della stessa funzione. Chiameremo tali sottoinsiemi *insiemi di sostituibilità funzionale*, spesso tralasciando l'aggettivo per sole ragioni di brevità.



*Per esempio, in un insieme di tavoli, usati come supporto per oggetti (questa è dunque la funzione considerata), sono individuabili vari sottoinsiemi di sostituibilità funzionale, ognuno contenente i tavoli che possono essere usati in modo equivalente per*

*soddisfare questa funzione: con una ripartizione grezza, l'insieme potrebbe includere il sottoinsieme dei tavoli grandi e quello dei tavoli piccoli.*

✎ Per esseri viventi che condividevano l'interesse per una stessa funzione, la possibilità di comunicare l'equivalenza o non-equivalenza di cose, e quindi la loro reciproca sostituibilità o non-sostituibilità in vista della realizzazione della funzione, diventava un *obiettivo utile*: si poneva il problema di trovare modalità efficaci ed efficienti a questo scopo. Una soluzione che venne identificata per questo problema fu di *esibire insieme* cose equivalenti per la funzione condivisa. Ma questa soluzione in molte situazioni si dimostrava impraticabile.

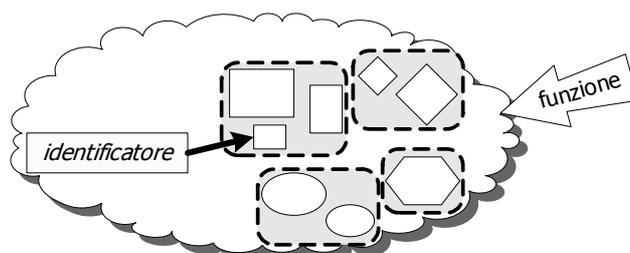
*Le ragioni di questa utilità possono essere anche solo di natura economica: il riconoscimento dell'effettiva equivalenza o non-equivalenza di cose per una funzione data potrebbe essere un compito costoso, per esempio perché complesso o lungo da portare a termine. Potrebbe essere quindi preferibile acquisire da altri questo dato di equivalenza invece di doverlo ottenere ogni volta da sé.*

*La soluzione di esibire cose per parlare di esse fu riscoperta dai saggi dell'Accademia di Lagado, incontrati da Lemuel Gulliver in un suo viaggio, ma egli stesso identificò in questa soluzione «l'inconveniente per cui, se un uomo ha da discorrere di varie e complesse faccende, è costretto a portarsi sulle spalle un sacco di cose, a meno che possa permettersi il lusso di farsi aiutare da servitori stracarichi».*

✎ Poi alcuni esseri viventi idearono una soluzione diversa per lo stesso problema: invece di esibire congiuntamente cose per comunicare la loro equivalenza per la funzione considerata, convennero che per ogni insieme di sostituibilità funzionale venisse scelta una cosa in quanto rappresentante dell'insieme, e quindi di ogni cosa inclusa in esso. Tale cosa assumeva così il ruolo di *identificatore di cose*. Chiunque fosse stato a conoscenza della relazione tra cose identificatori e cose identificate sarebbe stato perciò anche in grado di inferire l'equivalenza tra cose: cose identificate da uno stesso identificatore venivano riconosciute come funzionalmente sostituibili l'una con l'altra.

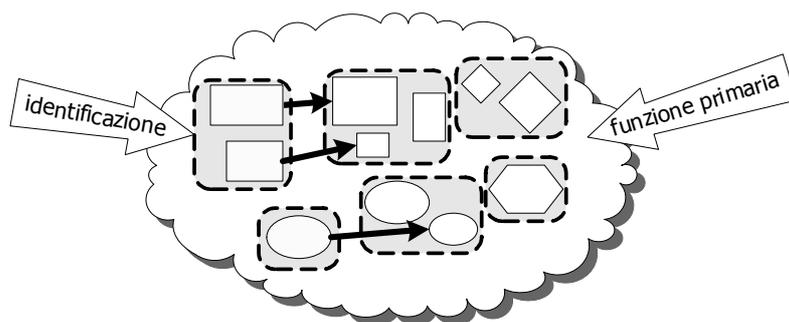
Naturalmente ogni cosa appartenente a un insieme di sostituibilità poteva essere usata come identificatore di se stessa e delle altre cose appartenenti all'insieme.

Ma alcuni esseri viventi impararono a usare come identificatori anche cose estranee alla funzione in base a cui gli insiemi di sostituibilità erano stati definiti, e in particolare quelle peculiari cose che sono i suoni che si emettono, i gesti che si fanno, i segni che si tracciano. La relazione tra identificatore e cosa identificata poteva essere, in questi casi, anche solo convenzionale.



*Per esempio, dati un insieme di tavoli e una funzione tale da definire in esso due sottoinsiemi di sostituibilità, corrispondenti a tavoli «grandi» e «piccoli» rispettivamente, potrebbero essere usati come identificatori due disegni, per identificare uno i tavoli grandi, l'altro quelli piccoli. È poi chiaro che il disegno di un tavolo grande non è in grado di svolgere la funzione di tavolo (e lo stesso si potrebbe dire per il suono «tavolo grande»), e quindi come tale non sarà incluso nell'insieme di sostituibilità che contiene i tavoli che esso identifica.*

☞ In seguito, alcuni esseri viventi si resero conto che l'identificazione era a sua volta una funzione in accordo alla quale potevano essere usate le cose. Come accadeva per ogni altra funzione, l'insieme delle cose usate per realizzare quella particolare funzione che è l'identificazione, dunque l'insieme degli identificatori, poteva essere ripartito in sottoinsiemi di sostituibilità, ognuno costituito dalle cose usate per identificare cose reciprocamente equivalenti dal punto di vista della realizzazione della funzione primaria.



*Per esempio, tutti i disegni di tavoli grandi possono essere usati come identificatori degli elementi dell'insieme di sostituibilità dei tavoli grandi, e analogamente per i tavoli piccoli. In ciò è necessario che ogni disegno di un tavolo grande sia distinguibile da ogni disegno di tavolo piccolo.*

Le capacità fondamentali che dovettero essere apprese furono dunque di riconoscere, o stabilire, *criteri di sostituibilità funzionale* tra cose e *criteri di identificazione* tra cose diverse rispetto a funzioni.

## CAPITOLO SECONDO

### LE RELAZIONI DI SOSTITUIBILITÀ FUNZIONALE E DI IDENTIFICAZIONE

Il racconto ci ha fornito un quadro generale degli argomenti che tratteremo: dobbiamo ora ripartire dai suoi contenuti, per considerarli un po' più analiticamente.

Il primo tema introdotto e che è opportuno riprendere riguarda *le funzioni*.

Senza con ciò negare l'interesse per eventuali problemi generali connessi con il significato di funzione, dal nostro punto di vista trattiamo l'attribuzione di funzioni a cose semplicemente come se si trattasse dell'*assunzione di un punto di vista* sulle cose stesse. Interpretiamo il riconoscimento che una cosa può essere usata per realizzare una funzione come *l'individuazione di una sua caratteristica*, dunque analogamente al fatto che essa sia dotata, per esempio, di una forma o di un colore. Rispetto al (cioè: dal punto di vista del) suo colore, una cosa potrebbe essere, per esempio, rossa: esibisce cioè il rosso come *manifestazione* specifica per la caratteristica «colore». In modo analogo, la cosa, per ogni funzione per cui è considerata, esibisce una manifestazione, che la caratterizza in riferimento alla sua capacità di realizzare la funzione data.

In questa prospettiva il saper realizzare una funzione di una cosa viene ricondotto a una caratteristica della cosa stessa (naturalmente non facciamo alcuna assunzione circa il fatto che tale caratteristica sia o meno «intrinseca» alla cosa, «primaria» o «secondaria» come si sarebbe detto nel passato: la caratteristica potrebbe essere in effetti relazionale, tale quindi che la manifestazione che la cosa esibisce al riguardo dipende non solo dalla cosa ma anche dal suo contesto e quindi eventualmente, in particolare, dal soggetto). Per brevità, scriveremo allora:

*caratteristica(cosa) = manifestazione*

per descrivere l'ipotesi che la *cosa* possa essere considerata in particolare dal punto di vista della *caratteristica* e che da questo specifico punto di vista essa esibisca la *manifestazione*. Per esempio, potrebbe essere che  $\text{colore}(cosa) = \text{rosso}$ , cioè che *cosa* sia considerabile dal punto di vista del suo colore e che a questo proposito si manifesti come rossa.

Quanto proposto nel precedente racconto risulta in questi termini facilmente formalizzabile:

- una stessa cosa può essere usata per realizzare funzioni diverse:

esistono caratteristiche diverse  $caratteristica_1, caratteristica_2, \dots$  tali che *cosa* può essere considerata in riferimento a esse, e quindi tali che  $caratteristica_1(cosa), caratteristica_2(cosa), \dots$  sono manifestazioni esibite da *cosa*; per esempio di una stessa cosa potrebbe essere che:

$$\text{colore}(cosa) = \text{rosso}$$

$$\text{forma}(cosa) = \text{parallelepipedo}$$

$$\text{altezza}(cosa) = 1,23m$$

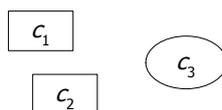
...

- cose distinte possono essere usate in modo equivalente per realizzare una stessa funzione:

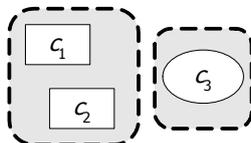
esistono cose diverse  $cosa_1, cosa_2, \dots$  tali da poter essere considerate dal punto di vista della stessa *caratteristica* e tali che le manifestazioni  $caratteristica(cosa_1), caratteristica(cosa_2), \dots$  sono reciprocamente equivalenti; in tal caso, dall'equivalenza di  $caratteristica(cosa_1), caratteristica(cosa_2), \dots$  si inferisce la sostituibilità di  $cosa_1, cosa_2, \dots$ ;

- se per esempio  $\text{colore}(cosa_1) = \text{rosso}$  e  $\text{colore}(cosa_2) = \text{rosso}$ , allora tra  $cosa_1$  e  $cosa_2$  dal punto di vista del loro colore sarebbe stabilita una relazione di sostituibilità.

Attrezzati con queste semplici precisazioni, possiamo ora tornare ad analizzare le relazioni di sostituibilità e di identificazione che avevamo introdotto nel racconto, e che continueremo a visualizzare nella forma di diagramma. Così, dato un insieme di tre cose, tavoli per esempio:

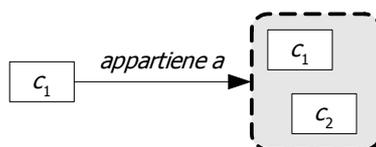


una relazione di sostituibilità potrebbe essere:



che indica che per la funzione considerata, essere usati come supporto per oggetti per esempio, i tavoli  $c_1$  e  $c_2$  sono considerati reciprocamente sostituibili, e quindi appartengono allo stesso insieme di sostituibilità (per esempio perché entrambi tavoli grandi), mentre il tavolo  $c_3$  è considerato essere in relazione di sostituibilità solo con se stesso (per esempio perché unico tavolo piccolo nell'insieme considerato).

Rappresentiamo inoltre in questo modo:



il fatto che il tavolo  $c_1$  appartiene all'insieme di sostituibilità costituito dai tavoli  $c_1$  stesso (naturalmente!) e  $c_2$ . Infine, visualizziamo nella forma:

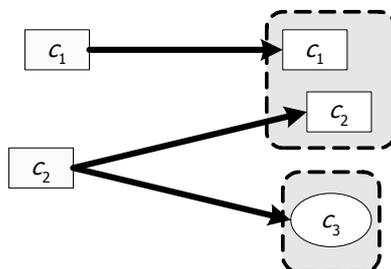


la relazione di identificazione, per cui la cosa  $c$ , per esempio un disegno, è usata come identificatore della cosa  $c'$ , per esempio un tavolo (si dovrebbe notare che la freccia a tratto fine con cui viene visualizzata l'appartenenza di una cosa a un insieme di sostituibilità ha come destinazione un insieme, mentre la freccia a tratto spesso che rappresenta diagrammaticamente l'identificazione termina nella cosa identificata: questa distinzione sarà importante in seguito).

Abbiamo dunque introdotto tre relazioni:

1. *la sostituibilità funzionale*, che qui formalizziamo per semplicità come una relazione riflessiva (ogni cosa è sostituibile con se stessa), simmetrica (date due cose  $c_1$  e  $c_2$ , se  $c_1$  è sostituibile con  $c_2$ , allora anche  $c_2$  è sostituibile con  $c_1$ ) e transitiva (date tre cose  $c_1$ ,  $c_2$  e  $c_3$ , se  $c_1$  sostituibile con  $c_2$  e  $c_2$  sostituibile con  $c_3$ , allora anche  $c_1$  è sostituibile con  $c_3$ ); una relazione che soddisfa queste proprietà è chiamata *relazione di equivalenza*, e dunque gli insiemi di sostituibilità sono, in effetti, classi di equivalenza in cui l'insieme delle cose è suddiviso;
2. *l'appartenenza di una cosa a un insieme di sostituibilità*, a proposito della quale facciamo l'ipotesi che, fissata una caratteristica, ogni cosa appartenga a uno e uno solo dei relativi insiemi di sostituibilità, non ammettendo così, per esempio, che dal punto di vista della sua forma una stessa cosa sia contemporaneamente un parallelepipedo e una sfera; si tratta, naturalmente, di un'ipotesi molto limitativa (una cosa tale che  $\text{forma}(cosa)=cubo$  verificherebbe naturalmente anche  $\text{forma}(cosa)=parallelepipedo$ , in corrispondenza del fatto che l'insieme dei cubi è incluso nell'insieme dei parallelepipedi), che assumiamo per semplificare il discorso che segue e lasciando al lettore interessato di esplorare possibili estensioni; in accordo a questa ipotesi, la relazione di appartenenza risulta formalizzata da ciò che in matematica si chiama una *funzione*, cioè una regola che associa a ognuno dei suoi argomenti uno e un solo valore; nel nostro caso la regola è *caratteristica*, l'argomento *cosa* e il valore *manifestazione*. Dunque  $\text{forma}(cosa)=parallelepipedo$  è una notazione funzionale, che si può leggere: la funzione *forma* applicata all'argomento *cosa* fornisce come valore *parallelepipedo* (si può inferire da ciò come la sinonimia tra funzioni, nel senso di «punti di vista sulle cose», e funzioni in senso matematico non sia incidentale...);
3. *l'identificazione*, formalizzata come una relazione *compatibile con la sostituibilità*, nel senso che, per ogni caratteristica stabilita e quindi per ogni ripartizione dell'insieme delle cose in

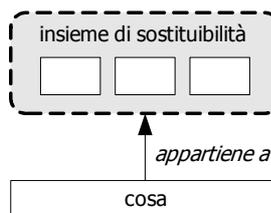
insiemi di sostituibilità, una cosa si considera utilizzabile come identificatore se e solo se lo è di tutte e sole le cose appartenenti allo stesso insieme di sostituibilità. L'identificazione è cioè tale che si ipotizza che la situazione:



non possa verificarsi, e ciò per la doppia ragione che una stessa cosa è impiegata per identificare cose non reciprocamente sostituibili ( $c_2$ , per esempio il disegno di un tavolo grande, non può identificare contemporaneamente  $c'_2$  e  $c'_3$  che sono non reciprocamente sostituibili, per esempio un tavolo piccolo e uno grande), e che cose reciprocamente sostituibili,  $c'_1$  e  $c'_2$  sono identificate da identificatori tra loro non sostituibili (i disegni sia di un tavolo grande che di un tavolo piccolo sono usati come identificatori di tavoli grandi, per esempio).

Queste tre relazioni possono essere presentate congiuntamente. Infatti:

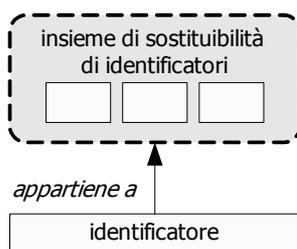
- fissata una funzione, una cosa data risulta appartenente a un insieme di sostituibilità (per esempio un tavolo grande appartiene all'insieme dei tavoli grandi, appunto reciprocamente sostituibili per la funzione considerata):



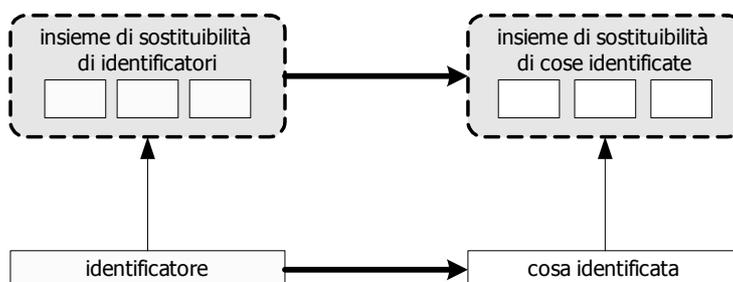
- tale cosa può essere identificata mediante un identificatore (il tavolo grande può essere identificato per esempio dal disegno di un tavolo grande):



- in questa sua funzione, tale identificatore non è in generale unico, e a sua volta appartiene dunque a un insieme di sostituibilità (nella sua funzione di identificatore, il disegno del tavolo grande è sostituibile con qualsiasi altro disegno di un tavolo grande):

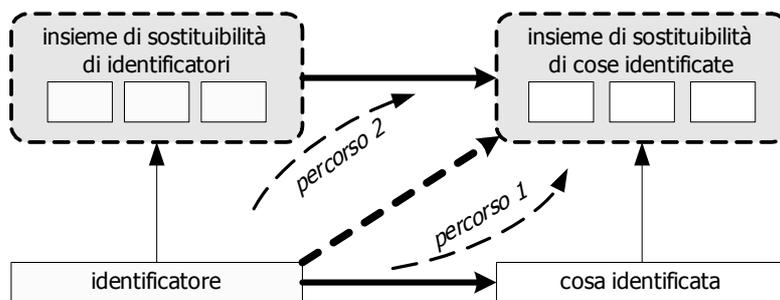


Non è poi difficile la verifica (che comunque tralasciamo per mantenere l'attenzione sul nostro tema) che la citata condizione di compatibilità tra sostituibilità e identificazione ci consente di introdurre una versione «astratta» della relazione di identificazione, valida tra insiemi di sostituibilità (l'insieme dei disegni dei tavoli grandi è in relazione di identificazione con l'insieme dei tavoli grandi, nel senso che ogni elemento del primo insieme può essere usato come identificatore di ogni elemento del secondo insieme). Mettendo insieme questi diagrammi:

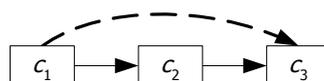


Pur nella relativa informalità con cui lo abbiamo introdotto, possiamo considerare questo come l'esempio di ciò che in algebra si chiamerebbe un «diagramma commutativo»: i due percorsi [1: identificatore  $\rightarrow$  cosa identificata  $\rightarrow$  insieme di sostituibilità di cose identificate] e [2: identificatore  $\rightarrow$  insieme di sostituibilità di identificatori  $\rightarrow$  insieme di sostituibilità di cose identificate] sono significativamente diversi, eppure da uno stesso punto di partenza portano a uno stesso risultato (per continuare nell'esempio, il disegno di un tavolo grande può essere inteso come identificatore di ogni tavolo grande, e quindi dell'insieme dei tavoli grandi, e ciò per due possibili ragioni: il disegno identifica uno specifico tavolo, che a sua volta nella sua funzione è sostituibile con altri tavoli [percorso 1]; il disegno è sostituibile nella sua funzione di identificatore con altri disegni, il cui insieme identifica l'insieme dei tavoli grandi [percorso 2]).

Si può dunque prescindere dalla specificazione del percorso e ipotizzare che *gli identificatori siano in relazione diretta con gli insiemi di sostituibilità* (il disegno di un tavolo grande ha la funzione di identificatore per ogni possibile tavolo grande):



(adotteremo qui la convenzione di visualizzare le relazioni indotte come frecce tratteggiate, tale che se, per esempio, nel diagramma:



le frecce a tratto continuo rappresentano la relazione «padre di», per cui  $c_1$  è padre di  $c_2$  e  $c_2$  è padre di  $c_3$ , allora la freccia

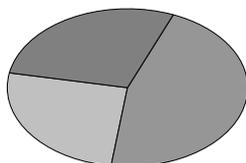
tratteggiata rappresenta la relazione indotta «padre del padre di», per cui  $c_1$  è nonno di  $c_3$ ).

È ancora la condizione di compatibilità tra sostituibilità e identificazione ad assicurarci (e ancora lasciamo la verifica al lettore) che la relazione diretta tra identificatori e insiemi di sostituibilità di cose identificate è tale che a ogni identificatore corrisponde uno e un solo insieme di sostituibilità, e quindi che tale relazione è in effetti una funzione.

*Il problema della (non) simmetria e della (non) transitività  
della sostituibilità*

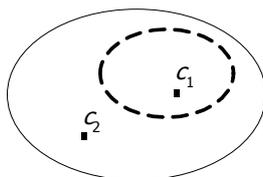
Prima di concludere questa breve analisi e provare a interpretarne i risultati alla luce del nostro problema generale, *cos'è «informazione»?*, riprendiamo l'accento fatto sopra circa la scelta di formalizzare *per semplicità* la sostituibilità come una relazione di equivalenza.

Che di una semplificazione si tratti è evidente non appena si consideri che, in conseguenza dell'applicazione di una relazione di equivalenza, l'insieme delle cose viene ripartito in sottoinsiemi esaustivi e mutuamente esclusivi, tali cioè che ogni cosa risulta appartenere a uno ed un solo sottoinsieme. Questa proprietà è ben visualizzata in termini insiemistici su un diagramma di Venn; le classi di equivalenza costituiscono una *partizione* dell'insieme di partenza, poiché lo ricoprono completamente (sono esaustive) senza sovrapporsi reciprocamente (sono mutuamente esclusive):



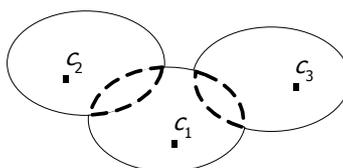
In questo modo ci si preclude la possibilità di formalizzare condizioni di sostituibilità che siano:

- *non reciproche*, quando una cosa risulta sostituibile con un'altra ma non viceversa:



(nella figura,  $c_1$  sarebbe sostituibile con  $c_2$ , perché l'insieme di sostituibilità di  $c_1$  include quello a cui appartiene  $c_2$ , ma non viceversa);

- *parziali*, quando dal fatto che una cosa è sostituibile con altre due non segue che queste siano a loro volta reciprocamente sostituibili:



(nella figura,  $c_1$  potrebbe essere sostituibile sia con  $c_2$  sia con  $c_3$  ma  $c_2$  e  $c_3$  non sono reciprocamente sostituibili).

Tornando alle tre proprietà che definiscono le relazioni di equivalenza, i problemi si pongono dunque a proposito non della riflessività (è difficile immaginare una situazione in cui una cosa non sia sostituibile con se stessa...) ma della simmetria e della transitività. Dalla scelta di formalizzare la sostituibilità come una relazione eventualmente non simmetrica e/o non transitiva seguirebbe, lo si vede facilmente, che una stessa cosa potrebbe appartenere a più insiemi di sostituibilità e di riflesso che uno stesso identificatore potrebbe essere associato contemporaneamente a più insiemi di sostituibilità. Il plausibile aumento di realismo di questa scelta si accompagnerebbe a un rilevante incremento della complessità della formalizzazione, ben oltre quanto necessario per gli scopi dell'analisi che stiamo qui compiendo.



## CAPITOLO TERZO

### INFORMAZIONE

Torniamo a prendere in considerazione la relazione di identificazione:



La funzione che la cosa identificatore  $c$  svolge rispetto alla cosa identificata  $c'$  è di *distinzione*, relativamente all'insieme di cose in esame; in presenza di più cose  $c'_1, c'_2, c'_3, \dots$  che sono identificabili e non sono reciprocamente sostituibili, il fatto che  $c$  identifichi  $c'_1$  equivale al fatto che  $c$  non identifichi  $c'_2, c'_3, \dots$ . Mediante un identificatore  $c$ , dunque, ogni cosa identificata  $c'$  viene distinta rispetto a (nel senso di: riconosciuta differente da) ogni altra cosa che non sia in relazione di sostituibilità con  $c'$  stessa.

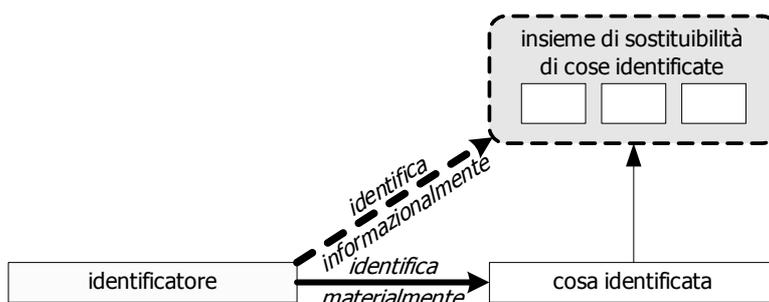
Poiché, come abbiamo notato sopra, ogni identificatore è associato univocamente a un insieme di sostituibilità di cose identificate, la distinzione che  $c$  consente di attuare rispetto a  $c'$  viene attuata anche rispetto all'intero insieme di sostituibilità a cui  $c'$  appartiene. Identificatori diversi (naturalmente nel senso di: non reciprocamente sostituibili nella loro funzione di identificatori) consentono perciò di distinguere cose identificate che non sono in relazione di sostituibilità e quindi insiemi di sostituibilità distinti.

Questo parallelismo non deve nascondere l'essenziale diversità tra i due casi di identificazione. A differenza delle cose identificatrici e delle cose identificate, gli insiemi di sostituibilità non sono caratterizzati primariamente in quanto parti del mondo fisico. Tali insiemi sussistono, infatti, in quanto è data una caratteristica in riferimento alla quale le cose incluse in ogni insieme vengono considerate reciprocamente sostituibili. Ogni insieme di sostituibilità è dunque interpretabile come «ciò

che hanno in comune» funzionalmente tutte le cose che appartengono all'insieme stesso, e specificamente la manifestazione che esse esibiscono.

In forma sintetica (e riservando alle prossime pagine una giustificazione della scelta), parleremo di questo genere di entità in termini di *informazione*.

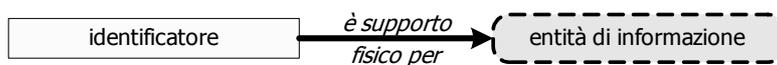
Diremo quindi che un identificatore *identifica materialmente* una cosa, mentre *identifica informazionalmente* l'insieme di sostituibilità a cui la cosa appartiene:



Questa scelta terminologica cerca di render conto della diversità essenziale tra i due tipi di identificazione. Mentre identificatore e cosa identificata hanno la stessa natura di parti del mondo fisico, nel caso di quella che abbiamo chiamato «identificazione informazionale» la relazione di identificazione è stabilita tra entità che hanno una natura diversa:

- nell'identificazione materiale una cosa *sta per* una cosa;
- nell'identificazione informazionale una cosa *è il supporto fisico per* un insieme di sostituibilità.

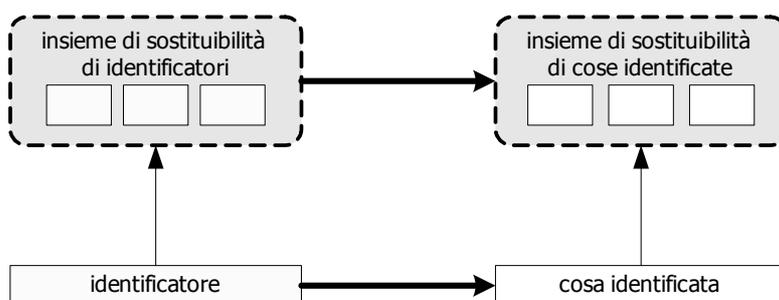
Nel caso in cui siano, in questo senso, oggetto di identificazione, diremo che gli insiemi di sostituibilità sono *entità di informazione*, di cui la cosa identificatore costituisce dunque il supporto fisico:



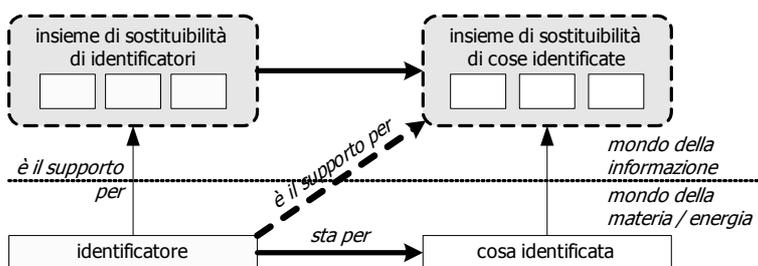
Le entità di informazione ammettono dunque due interpretazioni complementari:

- da un punto di vista *estensionale*, le entità di informazione sono insiemi di cose reciprocamente sostituibili in quanto esibiscono tutte una stessa manifestazione per la caratteristica considerata (l'insieme dei tavoli grandi è in questo senso un'entità di informazione perché i suoi elementi condividono l'essere grandi relativamente alla loro «tavolità»);
- da un punto di vista *intensionale*, le entità di informazione sono manifestazioni per la caratteristica considerata (l'essere un tavolo grande è in questo senso un'entità di informazione).

Degno di nota è il fatto che questa schematizzazione risulta applicabile anche alla relazione tra identificatori e insiemi di sostituibilità di identificatori, e dunque l'origine della relazione di sostituibilità definita sull'insieme degli identificatori può essere mantenuta sottintesa. Il diagramma:



introdotto in precedenza può essere allora interpretato così:



A dispetto delle loro analogie, le due relazioni di «essere il supporto fisico per» che appaiono in questo diagramma presentano una differenza essenziale:

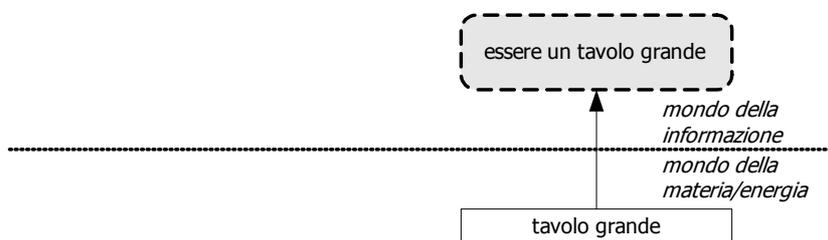
- rinviando a un'entità di informazione di identificazione, un identificatore *porta informazione*, nel suo ruolo di elemento dell'insieme di sostituibilità di identificatori;
- rinviando a un'entità di informazione identificata, un identificatore *porta informazione su*, cioè rende esplicita una componente referenziale nell'informazione.

Mentre la prima relazione è esclusivamente interna al sistema di identificatori, la seconda relazione prevede il riferimento a un'entità esterna a tale sistema. Se ne potrebbe concludere (ma non approfondiremo ulteriormente il tema) che la relazione di «portare informazione su» attiene (anche) alla dimensione semantica del concetto di informazione.

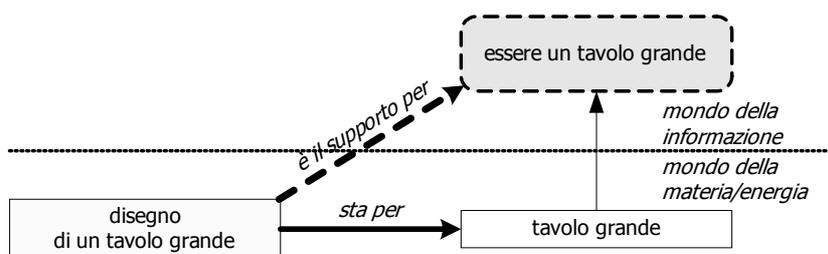
#### *Ancora l'esempio*

Passo passo, applichiamo il diagramma precedente al caso di tavoli identificati da disegni.

Supponiamo che la cosa che si intende identificare sia un tavolo grande (per esempio in quanto distinto da un tavolo piccolo). Quindi:

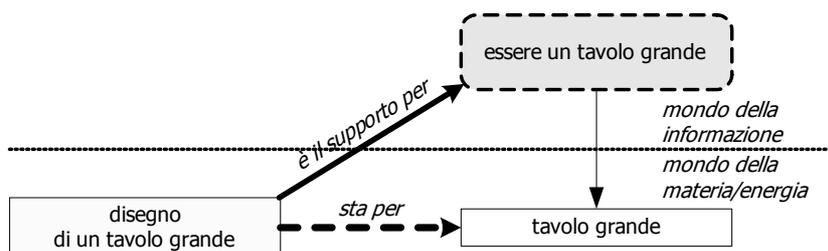


dove l'insieme di sostituibilità dei tavoli grandi è dunque presentato come l'entità di informazione «essere un tavolo grande». Il disegno di un tavolo grande può essere usato come identificatore:



nel senso che tale disegno consente di identificare materialmente il tavolo e informazionalmente l'entità «essere un tavolo grande». Per esempio, affisso sulla porta di una stanza e con un titolo del tipo «dotazione interna», il disegno potrebbe *portare informazione* su il tavolo che si trova in quella stanza: anche senza bisogno di entrare, se ne potrebbe concludere che nella stanza è presente un tavolo grande invece di uno piccolo.

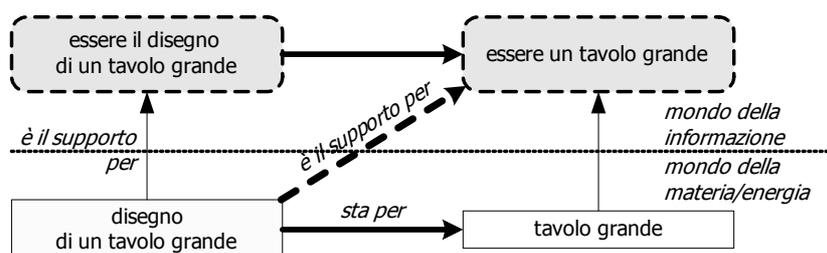
*Una nota: può essere opportuno accennare almeno al fatto che uno schema come il precedente sottintende alcune importanti questioni filosofiche, e in particolare il problema della relazione tra «cose» e «nomi» e il problema del significato di significato. La relazione fra le entità implicate potrebbe essere infatti anche intesa inversamente (appunto invertendo il senso della freccia verticale):*



*Secondo questa interpretazione, che il disegno del tavolo stia per la cosa-tavolo non è un fatto primitivo, ma è derivato da una precedente concettualizzazione del significato di «essere tavolo». È chiaro che i due schemi, e le interpretazioni sottostanti, sono complementari più che alternativi.*

Tutti i disegni riconoscibili come identificatori di tavoli grandi possono evidentemente svolgere questo compito, e ciò grazie al

fatto che tali disegni sono reciprocamente equivalenti in questa loro finalità:



Dunque, ogni disegno di un tavolo grande, oltre a *stare per* un tavolo grande:

- *porta l'informazione di* essere il disegno di un tavolo grande;
- *porta l'informazione su* il fatto che la cosa per cui sta è un tavolo grande.

#### *Ancora sulla non transitività della sostituibilità*

Consideriamo dunque che all'identificazione sia affidato il compito di *mantenere la distinzione* tra insiemi di sostituibilità distinti, e quindi tra entità di informazione distinte. La condizione di compatibilità tra sostituibilità e identificazione implica a questo riguardo che identificatori non in relazione di sostituibilità siano associati a entità di informazione distinte. Si possono apprezzare allora le conseguenze dell'eventuale generalizzazione delle nostre ipotesi, che porti ad ammettere la non transitività della relazione di sostituibilità.

Una sostituibilità che presentasse casi di non transitività si ricondurrebbe immediatamente a condizioni di distinzione parziale o limitata, in qualche modo intermedia tra l'indistinguibilità e la (completa) distinzione. Non c'è dubbio che tali situazioni «sfumate» siano spesso più la regola che l'eccezione; proprio allo scopo di renderle trattabili formalmente è disponibile un'insiemistica generalizzata, chiamata *teoria degli insiemi sfumati* (*fuzzy set*), che consente di rappresentare un'appartenenza anche solo parziale (più che nulla e meno che completa) di elementi a insiemi. Questa teoria prevede, tra

l'altro, una definizione generalizzata di partizione, tale che le classi di equivalenza fuzzy possono essere parzialmente sovrapposte e tale perciò che fra queste classi è definita una relazione, detta *compatibilità*, che è più debole dell'equivalenza perché non è transitiva.

Come abbiamo già considerato, pur consapevoli del limitato realismo della scelta di formalizzare la sostituibilità funzionale come una relazione di equivalenza riteniamo che per gli obiettivi di questo lavoro l'incremento di complessità concettuale e formale che comporterebbe l'introduzione di questo punto di vista più generale non sarebbe giustificato. Lasciamo al lettore interessato, e dotato del bagaglio di competenze necessarie, l'esplorazione di possibili estensioni al modello che abbiamo fin qui introdotto.

Da parte nostra, proprio a partire da questo modello è all'informazione e alle relazioni tra informazione e materia/energia, impiegata come supporto per informazione, che dedicheremo la nostra attenzione d'ora in poi.



## CAPITOLO QUARTO

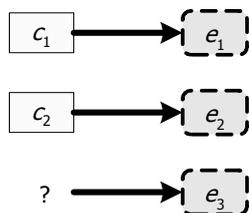
### LA RELAZIONE TRA MATERIA/ENERGIA E INFORMAZIONE

Poniamoci nella prospettiva complementare a quella mantenuta finora: dato un insieme di entità di informazione, quali condizioni devono essere soddisfatte perché cose scelte da un insieme siano adatte a essere usate come identificatori per tali entità di informazione?

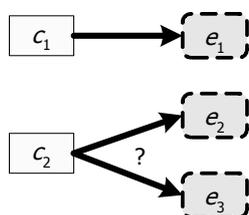
Il problema può essere posto in termini di *mantenimento della distinzione*: entità di informazione distinte devono poter essere identificate da identificatori diversi. A questo proposito si dovrebbe notare che il controllo del fatto che entità di informazione siano o meno distinte non può essere compiuto direttamente sulle entità di informazione stesse (che sono entità non fisiche; in quanto segue tralascieremo di considerare operazioni su entità di informazione effettuate mentalmente: non che in questo caso non sia necessaria la presenza di un supporto fisico, naturalmente, ma l'analisi delle relazioni tra supporto e informazione diventerebbe straordinariamente complessa e controversa, e comunque fuorviante rispetto ai nostri scopi). Tale controllo viene compiuto effettivamente su identificatori, dunque su parti della materia/energia, in termini di non sostituibilità, e quindi ricondotto alle entità di informazione identificate grazie all'univocità della relazione di identificazione. Quali condizioni devono essere dunque soddisfatte perché un insieme di cose identificatori sia in grado di mantenere la distinzione tra entità di informazione?

La risposta dovrebbe essere a questo punto evidente, in termini di *molteplicità del supporto*: occorre che l'insieme degli identificatori includa almeno tante cose non reciprocamente sostituibili quante entità di informazione distinte devono essere supportate. In caso contrario:

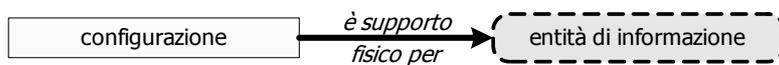
- o l'identificazione rimarrebbe incompleta (ci sarebbero delle entità di informazione non supportate da alcun identificatore, e quindi inutilizzabili):



- o l'identificazione non sarebbe compatibile con la sostituibilità (ci sarebbero delle entità di informazione distinte supportate da uno stesso identificatore o da identificatori in relazione di sostituibilità):



Questa condizione di molteplicità può essere soddisfatta disponendo di un insieme di cose che possono essere usate come identificatori non in relazione di sostituibilità, o anche di una sola cosa che può assumere stati diversi, e non in relazione di sostituibilità, in momenti diversi (quello di stato di una cosa, o più in generale di un sistema, è uno di quei concetti talmente fondamentali e pervasivi che non è facile definirlo: ci possiamo accontentare qui di considerare stati di una cosa come le sue «versioni temporali»). Per brevità, tratteremo in modo congiunto i due casi, parlandone in termini di *configurazioni di un sistema*, impiegato come supporto (e in breve: *configurazioni di un supporto*):



Considereremo quindi che le configurazioni di un supporto siano *gli insiemi di sostituibilità dei suoi stati*, e diremo che attraverso una relazione di identificazione a ogni configurazione del supporto è associata un'entità di informazione, e dunque che entità di informazione distinte sono supportate da configurazioni del supporto distinte. In questi termini la relazione di identificazione diventa formalmente una funzione, e in particolare una funzione tale da associare a ogni entità di informazione una e una sola configurazione (ciò che in matematica si chiama una funzione iniettiva). Come tale nel seguito la tratteremo.

Dal fatto che alle configurazioni del supporto è affidata la funzione di distinguere entità di informazione segue immediatamente che un sistema fisico riconosciuto in grado di assumere una sola configurazione (dunque un sistema «costante») non è adatto a essere impiegato come supporto per informazione. *Condizione necessaria perché un sistema fisico sia usato come supporto è che esso possa assumere almeno due configurazioni* (di sfuggita, si può notare come questa condizione non attenga esclusivamente alle caratteristiche fisiche del sistema, dato che la definizione stessa di configurazione, nonché la determinazione se due configurazioni siano o meno distinte, riguarda l'identificazione).

#### *La replica del supporto*

Che questa condizione non sia anche sufficiente è evidente, come abbiamo anche esemplificato nei diagrammi precedenti. Da quanto detto finora, infatti, si può concludere che il numero di configurazioni del supporto (la quantità che in insiemistica viene detta la cardinalità del supporto) *deve essere almeno pari al numero delle entità di informazione da supportare*. Il fatto è però che sovente l'insieme delle entità di informazione ha una cardinalità molto elevata. D'altra parte, le ragioni di inefficienza di un supporto che possa assumere un numero molto elevato di configurazioni sono molteplici: per citarne uno solo, la difficoltà a gestire manualmente la funzione di identificazione che a configurazioni fa corrispondere entità di informazione quando essa debba trattare molti casi distinti. La strategia abitualmente a-

dottata per affrontare questa difficoltà si basa sulla possibilità di *replicare il supporto*, cioè di disporre di una molteplicità di copie del supporto stesso, in modo da generare un super-supporto costituito da una successione di *supporti elementari* replicati.

La cardinalità del supporto così ottenuto è stabilita per via combinatoriale, a partire dalla cardinalità del supporto elementare replicato e dal numero di repliche impiegate. L'incremento di efficienza che se ne deriva può essere consistente. A titolo di esempio, scegliendo un supporto elementare il più semplice possibile, in grado perciò di assumere 2 configurazioni possibili (un supporto di questo genere viene chiamato *bistabile*, in riferimento alle due configurazioni stabili che può assumere), con una collezione ordinata di 8 repliche si ottiene un supporto in grado di identificare, e quindi distinguere,  $2^8=256$  entità di informazione diverse. È tipicamente più semplice gestire una funzione di identificazione tra configurazioni ed entità di informazione con 2 casi rispetto a una con 200 casi, sebbene nella prima ipotesi il supporto sia in effetti costituito da una successione di 8 supporti elementari.

Per chiarire la questione formale sottostante a questo discorso, consideriamo il caso di un supporto replicato di 3 supporti elementari bistabili, le cui configurazioni rappresentiamo come ○ e ● rispettivamente. Non è difficile allora convincersi che le possibili successioni di tale supporto sono associabili alle rappresentazioni binarie dei numeri interi da 0 a 7 inclusi, e sono le seguenti:

interpretabili	come:	111	e quindi:			1 × 2 <sup>2</sup> + 1 × 2 <sup>1</sup> + 1 × 2 <sup>0</sup> = 7
●●●		110	1	1	0	= 6
●●○		101	1	0	1	= 5
●○●		100	1	0	0	= 4
○●●		011	0	1	1	= 3
○●○		010	0	1	0	= 2
○○●		001	0	0	1	= 1
○○○		000	0	0	0	= 0

(ciò dovrebbe convincere che i famosi, famigerati, «zeri» e «uni» hanno in effetti una ragione, ma questa è puramente notazionale: ciò che conta è la bistabilità del supporto, che si realizza per

esempio come lampadina spenta/lampadina accesa, oppure passa corrente/non passa corrente. Che poi le due configurazioni siano denotate con «zero» e «uno», «falso» e «vero», o «paperino» e «topolino» tutto sommato poco cambia).

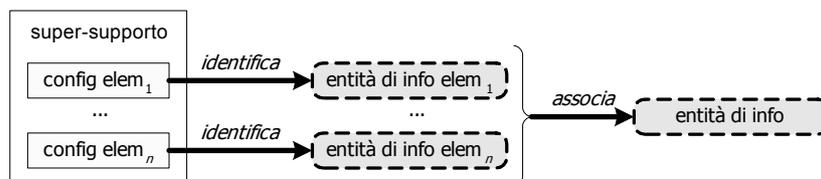
Ancora a mo' di esempio, questa stessa pagina è evidentemente un supporto ottenuto replicando supporti elementari (i caratteri stampati) in modo ordinato (carattere per carattere, riga per riga). Se ipotizziamo che la pagina sia costituita da 1000 caratteri ognuno scelto tra 70 possibili (lettere minuscole e maiuscole, cifre numeriche, segni di interpunzione vari), otteniamo che il numero di possibili configurazioni complessive del supporto, cioè il numero di «pagine possibili», è *molto* grande:  $70^{1000}$  (un numero composto dalla cifra 7 seguita da 1000 zeri!). Chi potrebbe avventurarsi nell'impresa di imparare a leggere pagine di questo genere se si trattasse di supporti monolitici, non organizzati come successioni di supporti elementari replicati?

È invece sufficiente imparare a riconoscere i singoli caratteri della pagina, mediante quella che possiamo definire una *funzione di identificazione elementare*, e quindi imparare a connettere caratteri in successione, mediante una funzione che chiameremo *di associazione*, per giungere a identificare quelle particolari entità di informazione che sono i testi. Dunque la funzione di identificazione:



nel caso di un supporto replicato viene in effetti realizzata in due passi successivi:

- la configurazione di ogni supporto elementare («configurazione elementare», per brevità) viene usata per identificare un'entità di informazione elementare;
- la successione di entità di informazione elementari viene associata a un'entità di informazione mediante una funzione di associazione:



Il fatto che la funzione di associazione stabilisca una corrispondenza tra entità di informazione (e non tra configurazioni di supporti ed entità di informazione) costituisce un'ulteriore ragione a favore della scelta di supporti replicati. In questo modo, la gestione di una parte considerevole della complessità propria della funzione di identificazione viene resa indipendente dalle limitazioni del supporto fisico e viene affidata al mondo dell'informazione. Ciò è rilevante in particolare nel caso di configurazioni complesse, per le quali la funzione di associazione risulta in effetti dalla composizione successiva di più funzioni. Si consideri, per esempio, la configurazione:

*chemin de fer*

che siamo in grado di interpretare a partire dal fatto che ne riconosciamo l'organizzazione in supporti elementari replicati:

*chemin de fer*

(o i supporti elementari replicati sono le singole macchie di inchiostro?)

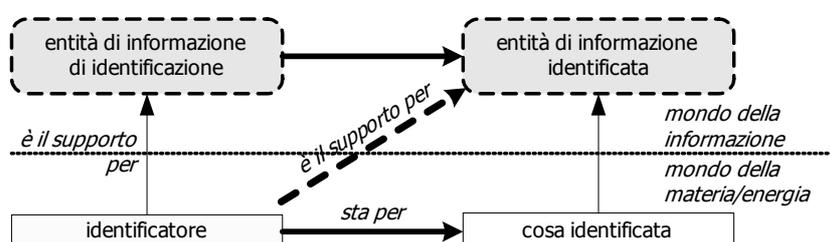
*e h*

È chiara l'arbitrarietà della scelta).

Il processo che da questo riconoscimento porta all'identificazione dell'entità di informazione, il termine «ferrovia» in lingua francese, è naturalmente ancora assai complesso: da lettere a parole, fino alla composizione nell'unica espressione idiomatica. Riprenderemo questo discorso nella Parte Terza, trattando di multimedialità.

*Un inserto epistemologico*

Un problema, di una certa rilevanza sia concettuale sia operativa, relativo alla funzione di identificazione riguarda quella che potremmo chiamare genericamente *la correttezza della corrispondenza* che mediante tale funzione si stabilisce tra entità di identificazione ed entità identificate. Ripartendo dal diagramma:



una condizione basilare di correttezza della corrispondenza può essere espressa così: una volta che un'entità di identificazione (cioè una cosa-identificatore o un'entità di informazione di identificazione) è stata posta in corrispondenza con un'entità identificata (cioè una cosa identificata o un'entità di informazione identificata) e fintanto che entità di identificazione ed entità identificate rimangono uguali a se stesse, anche la loro corrispondenza dovrebbe essere mantenuta inalterata. Questo significa che se per esempio un certo disegno viene usato per identificare un certo tavolo, lo stesso disegno dovrebbe continuare a identificare lo stesso tavolo, per lo meno se non si sceglie di ridefinire la funzione di identificazione relativamente a quel disegno. Si tratta perciò di una condizione di *stabilità* dell'identificazione.

Ciò lascia comunque aperta la questione del *criterio con cui l'identificazione viene inizialmente definita*, un tema che finora, a

partire dal nostro precedente racconto, abbiamo mantenuto implicito: il problema di correttezza della corrispondenza può essere posto anche a priori? È dato un criterio di decisione per cui, di fronte a una nuova cosa da identificare, dovrebbe essere scelto come identificatore un suono, per esempio, piuttosto che un altro?

In generale non si può rispondere che negativamente, con ciò riconoscendo che la funzione di identificazione ha un fondamento generale di convenzionalità. Ciò si manifesta nel fatto che la conoscenza della convenzione risulta condizione necessaria per il riconoscimento della corrispondenza: operativamente, coloro che non sono a conoscenza di tale convenzione non sarebbero in grado di ricostruire la corrispondenza solo a partire dagli identificatori e dalle cose identificate (si pensi alla comune esperienza dell'ascolto di un discorso tenuto in una lingua che non ci è nota).

Senza voler entrare in un tema che è patrimonio storico, almeno da Platone in poi, della filosofia del linguaggio e che come tale è stato ampiamente trattato, notiamo semplicemente che si presentano almeno due importanti situazioni in cui l'identificazione può (ma non necessariamente deve...) essere *non* convenzionale. Se, come abbiamo fatto sopra, scegliamo come identificatore per un tavolo un disegno, allora possiamo ipotizzare che tale disegno sia realizzato in modo da riprodurre alcune proprietà caratteristiche del tavolo da identificare, e sia quindi comprensibile nella sua funzione di identificatore anche senza dover previamente definire esplicitamente la corrispondenza. Una considerazione almeno parzialmente analoga si potrebbe fare a proposito della pronuncia (quindi della produzione di suoni) di termini onomatopeici. Una seconda situazione di possibile non convenzionalità è quella in cui la cosa da identificare è un tavolo grande, da identificare in quanto non solo distinto da non-tavoli (per esempio sedie), ma anche da tavoli non-grandi (per esempio tavoli piccoli). Anche in questo caso, l'identificatore potrebbe riprodurre l'essere grande del tavolo da identificare, in modo da risultare comunque comprensibile nella sua funzione.

Comune alle due situazioni è la scelta di definire la funzione di identificazione *sfruttando una struttura* di cui la cosa da identi-

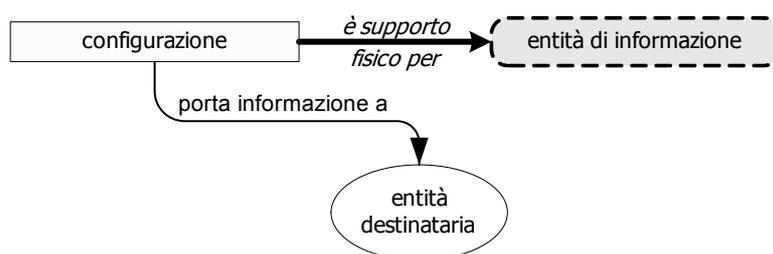
ficare è dotata: nel primo caso si tratta di una struttura interna alla cosa (il tavolo è costituito da un piano e delle gambe in una relazione spaziale definita, e questo viene riprodotto nel disegno-identificatore); nel secondo caso la struttura è invece esterna alla cosa da identificare e si realizza come relazione sull'insieme delle cose identificabili (tavoli grandi e piccoli, con i primi appunto più grandi dei secondi).

Vedremo nella Parte Seconda come la distinzione tra funzioni di identificazione relativamente alla convenzionalità della loro definizione possa essere appropriatamente espressa in termini dell'opposizione digitale-analogico.

### *Informazione e incertezza: un ruolo per la soggettività*

Abbiamo sostenuto finora che la condizione che rende un sistema fisico adatto a fare da supporto per informazione è la molteplicità delle configurazioni che esso può assumere. Esiste una seconda, per molti aspetti complementare, caratterizzazione del concetto di informazione.

Accanto alle configurazioni del supporto e alle entità di informazione, introduciamo l'ulteriore entità *a cui* l'informazione è (sup)portata:



Dal punto di vista di tale *entità destinataria*, la condizione di molteplicità appare come necessaria, ma certo non sufficiente. Se infatti l'entità conoscesse a priori (cioè: già disponesse dell'informazione su) la specifica configurazione assunta dal supporto, l'accesso a tale configurazione non porterebbe, soggettivamente, alcuna informazione. Secondo questa accezione, dunque, portare informazione implica produrre una novità o, più propriamente, *ridurre l'incertezza soggettiva* sulla configura-

zione del supporto, e quindi sull'entità di informazione identificata da tale configurazione.

Già in precedenza avevamo considerato come l'informazione non sia qualificabile in base alle sole caratteristiche fisiche (dunque «oggettive») del supporto, a causa della presenza della relazione di sostituibilità. Ora stiamo notando un condizionamento ancora più evidentemente extra-fisico, in termini dello *stato di conoscenze* di un'entità destinataria dell'informazione.

Questa condizione per caratterizzare l'informazione è evidentemente più generale di quella fondata sul requisito di molteplicità. Non solo, infatti, implica quest'ultima (si può ragionevolmente essere incerti sul supporto relativamente a quale configurazione esso abbia assunto solo se il supporto *può* assumere tale configurazione, che risulta quindi conteggiata in termini di molteplicità del supporto stesso), ma anche la estende, includendo il caso in cui lo stato di conoscenze dell'entità destinataria porti ad assegnare incertezze diverse alle varie configurazioni. È questa la base da cui storicamente è partita l'opera di formalizzazione del concetto di informazione e che anche qui prenderemo come riferimento sostanziale.

## CAPITOLO QUINTO

### UNA CARATTERIZZAZIONE QUANTITATIVA DELL'INFORMAZIONE

Sulla base di alcune semplici ipotesi, è possibile giungere a definire un concetto di *quantità di informazione* portata da una configurazione, e più in generale da una successione di configurazioni, di un supporto.

Consideriamo per ora un supporto non replicato, e supponiamo che il numero delle sue configurazioni sia  $n$  (dunque per quanto considerato in precedenza dovrà essere che  $n \geq 2$ ; non ci porremo invece il problema se  $n$  sia limitato a priori o possa diventare arbitrariamente grande). Denotiamo con  $c_i$  (con l'indice  $i$  che varia dunque tra 1 e  $n$ ) la configurazione  $i$ -esima.

Una generica configurazione  $c_i$  porta informazione se è, oggettivamente o soggettivamente, incerta. Per formalizzare il grado di incertezza che viene attribuito a ogni configurazione  $c_i$  impieghiamo, come è abituale, la sua misura di probabilità  $p(c_i)$  (che per brevità scriveremo  $p_i$ ), cioè una funzione che associa a ogni configurazione  $c_i$  un valore che può variare tra 0 (è certo che il supporto non si trova nella configurazione  $c_i$ ) e 1 (è certo che il supporto si trova nella configurazione  $c_i$ ). Mediante i loro valori di probabilità, due configurazioni sono dunque confrontabili rispetto al loro grado di incertezza; se  $p_i < p_j$  è perché la configurazione  $c_j$  è riconosciuta come più probabile, e quindi più certa, della configurazione  $c_i$ . Nel suo complesso, il supporto è dunque formalizzabile elencando l'insieme delle sue configurazioni possibili e per ognuna di queste la misura di probabilità corrispondente. Ciò può essere visualizzato sinteticamente mediante uno schema del tipo:

$$C = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & \dots & c_n \\ p_1 & p_2 & \dots & p_n \end{bmatrix}$$

su cui è posta la condizione che la somma  $p_1 + p_2 + \dots + p_n$  delle probabilità di tutte le configurazioni abbia valore 1 (più in bre-

ve:  $\sum p_i = 1$ ), in accordo con il fatto che è certo, cioè ha probabilità 1, che il supporto in ogni istante si trovi nella configurazione  $c_1$  oppure nella configurazione  $c_2$  oppure... oppure nella configurazione  $c_n$ .

Questa formalizzazione è basata sull'ipotesi che nel quantificare l'informazione si possa prescindere dalle specifiche caratteristiche fisiche del supporto: due sistemi fisici che risultano formalizzabili mediante uno stesso schema, e quindi hanno lo stesso numero di configurazioni e associano la stessa misura di probabilità a configurazioni corrispondenti, appaiono dunque in questo senso *informazionalmente identici*. Si noti inoltre che, a causa dell'ipotesi che il supporto non sia replicato, un analogo schema formalizza anche l'insieme delle entità di informazione: attraverso la funzione di identificazione ogni entità di informazione è identificata da una e una sola configurazione, e le probabilità  $p_i$  descrivono perciò il grado di incertezza sia delle configurazioni «portanti» sia delle entità di informazione «portate» (cioè  $p_i = p(c_i) = p(e_i)$  per ogni  $i = 1, \dots, n$ ). Quindi potremo scrivere:

$$E = \begin{bmatrix} e_1 & e_2 & \dots & e_n \\ p_1 & p_2 & \dots & p_n \end{bmatrix}$$

per denotare lo schema che formalizza un insieme di entità di informazione.

Sulla base di questi schemi, il problema che ci stiamo ponendo riguarda dunque le condizioni che ci consentano di associare a ogni configurazione  $c_i$  e a ogni corrispondente entità di informazione  $e_i$  una quantità di informazione, che indicheremo rispettivamente come  $I(c_i)$  e  $I(e_i)$ , oppure genericamente come  $I(x_i)$ .

Da quanto si è detto, è chiaro che  $I(x_i)$  dipende dal valore della probabilità  $p_i$ .

Per ragioni opposte, i due valori estremi della probabilità, 0 e 1, corrispondono a situazioni in cui l'accesso al supporto non porta informazione:

- nel caso di probabilità nulla (è certo che il supporto non si trova nella configurazione), perché, per definizione, si giudica che la configurazione non possa comunque presentarsi e quindi, operazionalmente, «non esiste»...;

- nel caso di probabilità unitaria (è certo che il supporto si trova nella configurazione), perché, come abbiamo già notato, se già prima di accedere al supporto non c'è incertezza a proposito di quale configurazione esibisca il supporto, l'accesso al supporto stesso non porta appunto alcuna informazione (in seguito all'accesso al supporto si potrebbe dire, propriamente, in questo caso: «lo sapevo già»...).

Abbiamo considerato come una configurazione porti informazione in tanto in quanto l'accesso a tale configurazione consente di ridurre l'incertezza circa lo stato in cui si trova il supporto. Questo ci permette di introdurre un'ulteriore condizione che la quantità di informazione  $I(c_i)$  dovrebbe soddisfare: se assumiamo per semplicità che l'accesso al supporto consenta di rimuovere ogni incertezza sulla sua configurazione, *quanto meno* è ritenuta a priori probabile una configurazione  $c_i$  *tanto maggiore* dovrà essere la quantità di informazione  $I(c_i)$  portata. In pratica, stiamo cercando una funzione con un andamento opposto a quello della probabilità: se la probabilità cresce, la quantità di informazione deve diminuire, e viceversa.

Molte funzioni verificano questa condizione, per esempio  $I(c_i) = -p_i$  oppure  $I(c_i) = 1/p_i$ . Per scegliere una funzione specifica per  $I(c_i)$ , occorre quindi imporre qualche altra condizione sui valori  $I(c_i)$ .

Supponiamo di impiegare un supporto replicato, per esempio costituito da due supporti elementari, la cui configurazione indichiamo con  $c_i \circ c_j$  (usiamo dunque l'operatore  $\circ$  per denotare la combinazione dei due supporti elementari). Ci possiamo porre in tal caso il problema di quanta informazione dovrebbe essere portata dalla combinazione di due configurazioni  $I(c_i \circ c_j)$ , in funzione delle quantità di informazione  $I(c_i)$  e  $I(c_j)$ . Un'indicazione al riguardo ci viene dalla considerazione che la successione delle configurazioni di un supporto replicato può essere interpretata come un'unica configurazione composta, la cui probabilità  $p(c_i \circ c_j)$  è calcolabile a partire dalle probabilità delle due configurazioni componenti  $p(c_i)$  e  $p(c_j)$ .

È utile a questo punto una breve digressione sulla misura di probabilità e sulle relazioni tra probabilità di configurazioni. Introduciamo l'argomento con un esempio, che tra l'altro ripren-

deremo poco sotto. Consideriamo un supporto elementare su cui può essere scritta una (e non più di una) lettera dell'alfabeto; il supporto replicato costituito dalla successione di supporti elementari di questo genere consente perciò di portare l'informazione su successioni di lettere, dunque su testi. Supponiamo di calcolare la probabilità di ogni lettera come la frequenza con cui tale lettera compare in uno scritto, diciamo in italiano, un'ipotesi che ci riconduce quindi all'interpretazione oggettivistica dell'incertezza. Se il testo in esame è costituito, per esempio, da 1000 caratteri e 80 di questi sono a, ne possiamo concludere che la probabilità di osservare un supporto elementare in una configurazione elementare corrispondente a tale lettera, in breve  $p(a)$  sarà pari a  $80/1000$ , cioè 8%, cioè 0,08. Con un procedimento analogo potremmo ottenere per le lettere u e q le probabilità  $p(u)=0,007$  e  $p(q)=0,04$  (per inciso, queste frequenze sono state calcolate su questa stessa pagina). Su questi dati, consideriamo un supporto replicato costituito da due soli supporti elementari, nel primo dei quali supponiamo di aver trovato la lettera q; dovrebbe essere chiaro che la probabilità di trovare nel secondo la lettera u è in tal caso uguale pressoché a 1, data la pratica certezza che in un testo italiano a q segua u. Se indichiamo con  $p(u|q)$  la probabilità di osservare u dopo aver osservato, nel supporto elementare precedente, q, otteniamo il fatto che  $p(u)$  e  $p(u|q)$  sono (sensibilmente) diversi: la probabilità di u condizionata da q è diversa dalla probabilità «assoluta» di u.

La situazione più semplice da trattare è quella in cui questo effetto di memoria (o anche: di dipendenza dal contesto) non compare e per ogni coppia di configurazioni  $c_i$  e  $c_j$  vale che  $p(c_i)$  e  $p(c_i|c_j)$  sono uguali: il fatto che un supporto elementare si trovi in una particolare configurazione non influenza la configurazione dell'altro supporto elementare e quindi si dice che i due sono *statisticamente indipendenti*. In tal caso è immediato che la probabilità della configurazione complessiva è pari al prodotto delle probabilità delle configurazioni dei supporti elementari:

$$p(c_i \circ c_j) = p(c_i) p(c_j).$$

Se ne potrebbe concludere che la quantità di informazione  $I(c_i \circ c_j)$  dovrebbe dipendere, corrispondentemente, dal prodotto delle quantità di informazione  $I(c_i)$  e  $I(c_j)$ . Ciò non è però affatto

corrispondente a un concetto intuitivo di quantità di informazione: si dovrebbe ottenere che le quantità di informazione «componenti»  $I(c_i)$  vengano *sommate*, e non moltiplicate, per ottenere la quantità di informazione «composta»  $I(c_i \cdot c_j)$ . In fondo, è ragionevole supporre che la quantità di informazione portata da due pagine di testo sia la somma, e non il prodotto, delle quantità di informazione portate separatamente dalle due pagine.

Una funzione elementare della matematica, il logaritmo, ha esattamente la proprietà di «trasformare prodotti in somme», nel senso che  $\log(x \cdot y) = \log(x) + \log(y)$ . Da qui viene la scelta abituale di formalizzare la quantità di informazione in funzione non direttamente della probabilità delle configurazioni, ma del logaritmo di tale probabilità. E siccome poi, come abbiamo considerato, quantità di informazione e probabilità devono avere un andamento opposto,  $I(c_i)$  viene definita mediante il logaritmo dell'inverso della probabilità:

$$I(c_i) = \log(1/p_i)$$

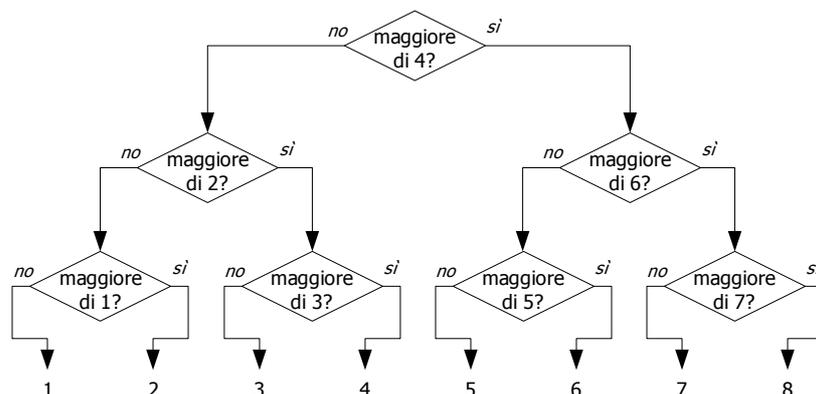
(come fatto solo notazionale, ricordiamo che  $1/p_i = p_i^{-1}$  e che, per le proprietà dei logaritmi,  $\log(p_i^{-1}) = -\log(p_i)$ , un'altra scrittura per la medesima formula). In questo modo risulta in effetti che  $I(c_i \cdot c_j) = I(c_i) + I(c_j)$ , come stavamo cercando, e inoltre, ricordando le proprietà dei logaritmi, che  $I(c_i) = 0$  se  $p_i = 1$  (dato che appunto il logaritmo di 1 vale, notoriamente, 0...), proprio come avevamo richiesto.

Poiché la funzione logaritmo può essere calcolata solo se ne viene specificata la base (cioè il numero a cui deve essere elevato il valore del logaritmo stesso per ottenerne l'argomento; un esempio: il logaritmo in base 2 di 8 è 3, scritto  $\log_2(8) = 3$ , nel senso che  $2^3 = 8$ ), rimane solo la decisione, per altro convenzionale, di quale base usare al riguardo. La scelta può essere compiuta a partire dall'ipotesi che il valore  $I(c_i) = 1$ , dunque «l'unità di misura», corrisponda a una configurazione assunta da un supporto *informazionalmente minimo*. Il supporto più semplice che si può scegliere prevede due sole configurazioni equiprobabili, tali dunque che  $p_1 = p_2 = 0,5$ . In tal caso,  $I(c_1) = I(c_2) = \log(1/0,5) = \log(2)$ . Non è allora difficile verificare che la base che soddisfa la condizione  $I(c_i) = 1$ , cioè un valore  $x$

tale che  $\log_x(2)=1$ , è 2. Con questa scelta, l'unità di misura della quantità di informazione  $I(c_i)$  viene definita *bit* e dunque:

$$I(c_i) = -\log_2(p_i) \text{ bit}$$

Un semplice esempio di applicazione di questa formula può essere forse utile. Assumiamo che la misura di probabilità sia distribuita uniformemente tra le configurazioni, e quindi che  $p_1=p_2=\dots=p_n=1/n$  se il numero delle configurazioni è  $n$ ; allora per  $n=8$  si ottiene che  $I(c_i)=-\log_2(1/8)=\log_2(8)=3$  bit (perché  $2^3=8$ ): la selezione di una configurazione tra 8 possibili (ed equiprobabili) porta una quantità di informazione pari a 3 bit. Se ne può anche concludere che la selezione di una specifica configurazione tra 8 *richiede l'acquisizione* di informazione per una quantità di 3 bit: per indovinare un numero tra 1 e 8 sono sufficienti 3 domande formulate in modo tale da richiedere una risposta affermativa o negativa, e quindi in grado di discriminare tra due alternative (ogni risposta porta dunque 1 bit di informazione):

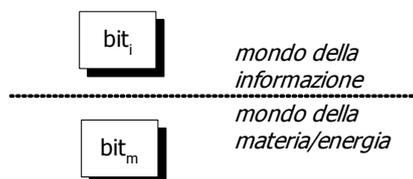


Ne possiamo concludere che, mentre la funzione di identificazione consente di stabilire *quale* informazione è portata da una configurazione, la funzione quantità di informazione definisce *quanta* informazione ogni configurazione porta.

*Bit, e bit<sub>m</sub>*

Si dovrebbe notare che il significato di bit appena introdotto non coincide con quello impiegato abitualmente, che invece fa riferimento a dispositivi fisici bistabili, cioè, come abbiamo già ricordato, in grado di assumere una configurazione scelta tra due possibili (quelle che in precedenza abbiamo rappresentato come  $\bigcirc$  e  $\bullet$ : i famosi «0» e «1»...).

In riferimento ai diagrammi introdotti in precedenza, è chiaro che i bit di cui si tratta abitualmente sono particolari supporti fisici, e quindi stanno nella parte bassa dei diagrammi, mentre i bit appena introdotti consentono di quantificare l'informazione, e quindi nei diagrammi stanno in alto. Per chiarire questa distinzione, parleremo di bit<sub>m</sub> («bit di memoria», ma, allusivamente, anche «di materia») e di bit<sub>i</sub> («bit di informazione»):



Dunque:

- un bit<sub>m</sub> è un supporto fisico bistabile;
- 1 bit<sub>i</sub> è la quantità di informazione ottenuta accedendo a un supporto che si trova in una configurazione con probabilità pari a 0,5.

Se ne potrebbe comunque concludere che i bit<sub>m</sub> costituiscano la materializzazione dei bit<sub>i</sub>, nel senso che un supporto costituito da 1 bit<sub>m</sub> porterebbe 1 bit<sub>i</sub> di informazione. Questo non è però, in generale, vero: un supporto di 1 bit<sub>m</sub> porta infatti 1 bit<sub>i</sub> di informazione solo nel caso in cui le due configurazioni che può assumere sono equiprobabili e quindi appunto  $p_1=p_2=0,5$ . Se invece, per esempio,  $p_1=0,25$  e  $p_2=0,75$  (un possibile significato di questi valori è che potendo ripetere un numero sufficientemente elevato di volte l'accesso al supporto lo osserveremmo solo una volta su quattro nella configurazione  $c_1$ ), allora la

quantità di informazione portata da un tale supporto nella configurazione  $c_1$  non è 1 bit<sub>i</sub> ma:

$$I(c_1) = -\log_2(p_1) = -\log_2(0,25) = -\log_2(1/4) = \log_2(4) = 2 \text{ bit}_i$$

D'altra parte,  $I(c_2) = -\log_2(0,75) = 0,4 \text{ bit}_i$  circa [per chi vuole cimentarsi nel conto e non dispone di una calcolatrice in grado di calcolare direttamente i logaritmi in base 2, ricordiamo che  $\log_2(x) = \log_{10}(x) / \log_{10}(2)$ ].

In dipendenza dal grado di incertezza delle varie configurazioni, dunque, uno stesso supporto di 1 bit<sub>m</sub> può portare sia più di 1 bit<sub>i</sub> sia meno di 1 bit<sub>i</sub> di informazione. In termini ancora del tutto qualitativi, ne concludiamo che un supporto possa essere usato in modo più o meno efficiente, una valutazione derivabile dal rapporto tra bit<sub>i</sub> (*portati*) e bit<sub>m</sub> (*portanti*). È possibile, in particolare, che un bit<sub>m</sub> porti mediamente più di 1 bit<sub>i</sub> di informazione?

### *Ridondanza e compressione*

Questo problema è di particolare importanza nella valutazione di quella che si potrebbe chiamare *efficienza informazionale* dei supporti replicati. Supponiamo di stare impiegando un supporto replicato costituito da un insieme di 100 supporti elementari bistabili (100 bit<sub>m</sub> dunque), 25 che si trovano nella configurazione  $c_1$  e 75 nella configurazione  $c_2$ . Quanta informazione porta, nel suo complesso, il supporto in questa configurazione, che possiamo indicare come  $25c_1 \cdot 50c_2$ ?

Nell'ipotesi di indipendenza statistica dei supporti elementari, abbiamo notato come si possa ottenere la quantità di informazione complessiva sommando le quantità di informazione portate dai singoli supporti elementari. Dunque  $25 I(c_1) + 75 I(c_2)$ . D'altra parte, possiamo trattare le frequenze relative,  $25/100$  e  $75/100$ , anche come probabilità  $p_1$  e  $p_2$ . Perciò:

$$\begin{aligned} I(25c_1 \cdot 50c_2) &= 25 I(c_1) + 75 I(c_2) = \\ &= -25 \log_2(0,25) - 75 \log_2(0,75) \approx 80 \text{ bit}_i \end{aligned}$$

(per l'ultimo conto abbiamo riutilizzato i valori calcolati sopra).

Possiamo cioè dire che, in questo caso, 100 bit<sub>m</sub> portano circa 80 bit<sub>i</sub> di informazione, un'affermazione che perderebbe la sua

apparente paradossalità se semplicemente la riesprimessimo in termini di 100 supporti elementari bistabili che portano complessivamente appunto 80 bit<sub>i</sub> circa di informazione. Ma per portare 80 bit<sub>i</sub> non dovrebbero essere sufficienti 80 bit<sub>m</sub>? Usandone 100 non stiamo sottoutilizzando il supporto? Oppure, complementariamente: disponendo di 100 bit<sub>m</sub> non dovremmo essere in grado di portare 100 bit<sub>i</sub>? Portandone 80 non stiamo, come detto, sottoutilizzando il supporto?

Vedremo che da questo «mistero dei 20 bit eccedenti» (o mancanti, a seconda del punto di vista) emergerà una conclusione che è contemporaneamente fondamentale da un punto di vista concettuale e di grande importanza pratica. Prima facciamo però un altro esempio, per mostrare quanto il problema di cui stiamo trattando sia in effetti comune. L'esempio è:

una frase come questa

che se anche trovassimo scritta (o pronunciata) così:

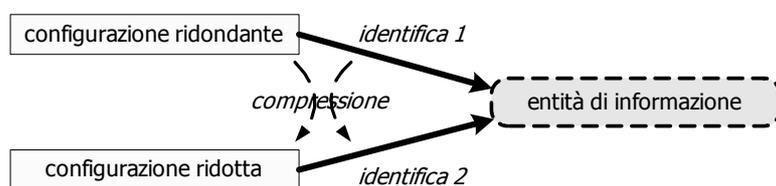
un fras com quest

riusciremmo a ricostruire senza ambiguità anche se alcune sue parti si sono perse, segno del fatto che tali parti, pure incluse nel supporto, portavano un'informazione solo accessoria, a cui si poteva anche rinunciare senza perdere in comprensibilità. In altri termini la *stessa* informazione, originariamente portata da un supporto di 21 caratteri (contando anche gli spazi di separazione tra parole) viene ora portata da un supporto con 4 caratteri in meno. Ciò è reso possibile dal fatto che i caratteri che costituiscono la frase non sono statisticamente indipendenti: avendo assunto che le parole di cui la frase è composta siano tratte dal lessico italiano, abbiamo constatato che i caratteri finali di ogni parola risultano, appunto, ininfluenti per la ricostruibilità dell'informazione di partenza.

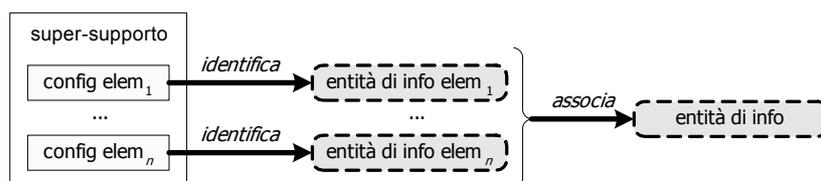
(Una domanda, per inciso: perché allora usiamo abitualmente supporti che potremmo ridurre? Se è ben vero che spesso potremmo parlare e scrivere meno pur comunicando la stessa informazione, questa prolissità sdrammatizza l'atto di accedere al supporto per ottenerne informazione; in un supporto non riducibile ogni supporto elementare porta informazione non rico-

struibile altrimenti e dunque «imperdibile», una situazione accettabile solo nei casi in cui le condizioni di accesso al supporto sono, nello stesso tempo, garantite per qualità – non ci si può sbagliare! – ma critiche per quantità – non si può proferire una sillaba di troppo!).

Supporti con questa caratteristica di non minimalità dovuta alla non indipendenza statistica dei loro componenti vengono detti *ridondanti*. Un supporto ridondante risulta sottoutilizzato nel suo ruolo di portatore di informazione, e può essere «ridotto» a parità di informazione portata, con un'operazione detta di *compressione* del supporto. Una compressione si realizza in effetti sostituendo alla configurazione di un supporto ridondante la configurazione di un supporto ridotto e adottando un'opportuna funzione di identificazione per il nuovo supporto, in modo che esso identifichi la stessa entità di informazione identificata dalla configurazione del supporto ridondante. Dunque:

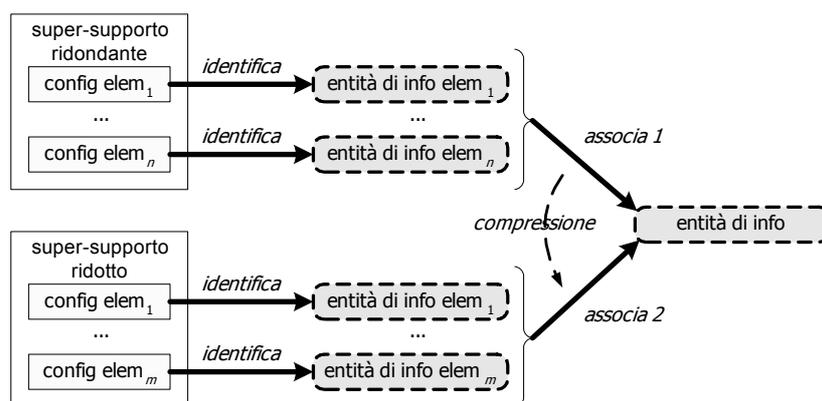


Naturalmente sono oggetto possibile di questa trasformazione solo i supporti replicati (un supporto non replicato ha una cardinalità pari a quella dell'insieme delle entità di informazione che identifica, e quindi è a priori non comprimibile). Ricordando la struttura che ha in questo caso la funzione di identificazione:



si chiarisce come la compressione consista nella riduzione del numero di entità di informazione elementari (nel diagramma

successivo vale dunque che  $m < n$ ) necessarie a identificare l'entità di informazione in esame:



Il diagramma mostra come la compressione si realizzi sostituendo la funzione di associazione iniziale con una più efficiente.

*Rimandiamo all'Appendice 1 di questa Parte per l'illustrazione di un semplice esempio relativo alla compressione di un supporto replicato.*



## CAPITOLO SESTO

### LA RELAZIONE TRA MATERIA/ENERGIA E INFORMAZIONE: I LIMITI FONDAMENTALI

Quanto abbiamo considerato nelle righe precedenti mette in evidenza la complessità della funzione di identificazione, e in particolare della funzione di associazione nel caso dei supporti replicati. Variando tale funzione, infatti:

- si possono scegliere configurazioni diverse che identifichino una stessa entità di informazione;

ma anche:

- si possono scegliere entità di informazione diverse identificate da una stessa configurazione.

In corrispondenza di ciò, si pongono due problemi generali che per molti aspetti sono complementari l'uno all'altro. Li chiameremo «il problema del minimo» e «il problema del massimo», e per mettere in evidenza la loro complementarità li presenteremo in parallelo. Come si vedrà, entrambi attengono all'esistenza di limiti quantitativi a proposito della relazione tra mondo della materia/energia e mondo dell'informazione.

<i>Il problema del minimo</i>	<i>Il problema del massimo</i>
Per ogni insieme di entità di informazione, è possibile determinare il <i>minimo supporto</i> in grado di identificare tale informazione?	Per ogni supporto, è possibile determinare il <i>massimo insieme di entità di informazione</i> che può essere identificato da tale supporto?

*In termini più formali questi problemi possono essere riespressi come segue:*

dato un insieme di entità di informazione con associata una distribuzione di probabilità, qual è il minimo numero di bit<sub>m</sub> necessari per identificare le entità di informazione in tale insieme mediante un supporto replicato?

dato un supporto di cui è fissato il numero delle configurazioni ma non la distribuzione di probabilità, qual è la quantità di informazione massima che può essere portata da tale supporto?

*La soluzione di questi problemi consente di affrontare questioni operative come:*

data una successione di 100 entità di informazione ognuna scelta statisticamente da uno schema E (potrebbe essere un testo in italiano di 100 caratteri se E è costituito dall'alfabeto italiano e dalla distribuzione di probabilità dei vari caratteri), qual è il minimo numero di bit<sub>m</sub> necessari per identificare tale successione?

data una successione di 100 supporti replicati di ognuno dei quali è fissato il numero delle configurazioni ma non la distribuzione di probabilità (potrebbe essere un foglio su cui si possono scrivere 100 configurazioni, ognuna corrispondente a un carattere dell'alfabeto italiano), qual è la quantità di informazione massima che può essere portata da tale successione?

Per questi problemi (che vengono usualmente presentati, nel contesto della teoria matematica dell'informazione, in termini un po' diversi da quelli che abbiamo adottato qui) è nota una soluzione generale, e particolarmente semplice ed elegante.

Introduciamo dapprima una definizione: si chiama *entropia di uno schema X*, in simboli  $I(X)$ , la quantità media di informazione di quello schema. Dunque se:

$$X = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ p_1 & p_2 & \dots & p_n \end{bmatrix}$$

allora:

$$\begin{aligned} I(X) &= \langle I(x_i) \rangle = \sum p_i I(x_i) = \\ &= -\sum p_i \log_2(p_i) \text{ bit per elemento} \end{aligned}$$

(a seconda del fatto che lo schema formalizzi un supporto,  $X=C$ , o un insieme di entità di informazione,  $X=E$ , possiamo parlare di entropia del supporto o dell'insieme delle entità di informazione rispettivamente).

Per esempio, l'entropia dello schema (che verrà utilizzato più ampiamente nell'Appendice 1 di questa Parte):

$$E = \begin{bmatrix} e_1 & e_2 & e_3 & e_4 \\ 1/2 & 1/4 & 1/8 & 1/8 \end{bmatrix}$$

è:

$$\begin{aligned} I(E) &= \sum p_i I(e_i) = \frac{1}{2} \times 1 + \frac{1}{4} \times 2 + 2 \times \frac{1}{8} \times 3 = \\ &= 1,75 \text{ bit medi per entità di informazione} \end{aligned}$$

L'entropia è lo strumento basilare per risolvere i nostri due problemi.

*La soluzione del problema del minimo:* il numero minimo di bit<sub>m</sub> per configurazione necessari per identificare un'entità di informazione scelta statisticamente da uno schema E è dato dall'entropia I(E) dello schema, cioè dal valore:

$$I(E) = \sum p_i I(e_i) \text{ bit}_m \text{ per configurazione}$$

L'entropia di uno schema E rappresenta quindi il limite inferiore alla possibilità di compressione di un supporto per l'insieme di entità di informazione formalizzato da E.

*La soluzione del problema del massimo:* la quantità di informazione massima che può essere portata da un supporto C di cui è fissato il numero delle configurazioni ma non la distribuzione di probabilità è data dall'entropia del supporto calcolata in condizioni di equiprobabilità, cioè dal valore:

$$K(C) = \sum p_i I(e_i) \text{ per } p_i = 1/n$$

e dunque:

$$\begin{aligned} K(C) &= \sum \frac{1}{n} \log_2(n) = \\ &= \log_2(n) \text{ bit per entità di informazione} \end{aligned}$$

Chiameremo questa grandezza  $K(C)$ , che rappresenta dunque il limite superiore alla possibilità di utilizzo di un supporto  $C$ , *capacità* del supporto.

(Queste *soluzioni* sono risultato di teoremi dimostrati da Shannon negli anni Quaranta del secolo scorso, nel contesto di un lavoro finalizzato alla caratterizzazione quantitativa dei sistemi per la trasmissione dell'informazione: l'uso che abbiamo fatto qui di tali teoremi ne mostra la generalità).

Sia dato uno schema  $X$  di cui è fissata la cardinalità,  $n$ , ma non la distribuzione di probabilità. Al variare di quest'ultima si mostra facilmente che vale:

$$0 \leq I(X) \leq K(X)$$

Questo significa che i valori di entropia per  $X$  variano tra 0, nel caso in cui un elemento dello schema ha probabilità 1 e tutti gli altri hanno probabilità 0, e  $\log_2(n)$ , nel caso in cui tutti gli elementi dello schema hanno la stessa probabilità  $1/n$ .

Tra i due limiti  $I(X)$  e  $K(X)$  si gioca dunque la gestione quantitativa della relazione tra supporti fisici e informazione:

- la maggiore compressione di un supporto giunge al limite inferiore dato dall'entropia  $I(E)$ ;
- la maggiore quantità di informazione portata da un supporto giunge al limite superiore della capacità  $K(C)$ .

*Rimandiamo all'Appendice 2 di questa Parte per l'illustrazione di un semplice esempio a riguardo di questi due limiti fondamentali.*

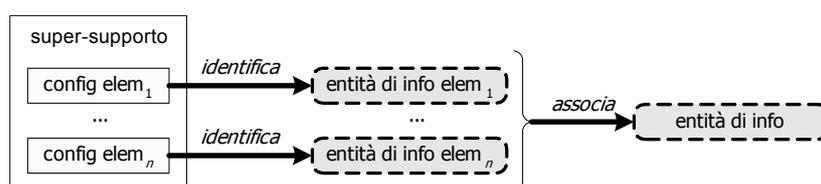
## Appendice 1

### Un esempio di compressione per un supporto replicato

Consideriamo l'insieme di entità di informazione formalizzato dallo schema:

$$E = \begin{bmatrix} e_1 & e_2 & e_3 & e_4 \\ 1/2 & 1/4 & 1/8 & 1/8 \end{bmatrix}$$

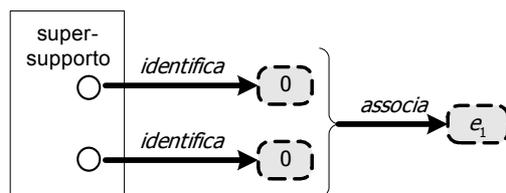
e poniamoci il problema di scegliere un opportuno supporto replicato per E, supponendo di adottare come supporti elementari dei dispositivi bistabili  $\bigcirc$  e  $\bullet$ , cioè dei bit<sub>m</sub>. Ricordando il diagramma:



si tratta dunque specificamente di stabilire una opportuna funzione di associazione tra successioni di entità di informazione elementari (denoteremo ogni entità di informazione elementare come «0» o «1»), ed entità  $e_i$ . Poiché la cardinalità dell'insieme di entità di informazione è 4, successioni di due entità di informazione elementari sono sufficienti per il nostro scopo. La scelta usuale per la funzione di associazione è infatti:

$$\begin{aligned} 00 &\rightarrow e_1 \\ 01 &\rightarrow e_2 \\ 10 &\rightarrow e_3 \\ 11 &\rightarrow e_4 \end{aligned}$$

(per chiarezza, e pur sapendo di stare... introducendo ridondanza, ribadiamo:



e analogamente per le altre tre entità di informazione) per cui per esempio la successione  $e_1e_2e_1$  verrebbe portata dal supporto:

○ ○ ○ ● ○ ○

identificato in 000100 e la cui «regola di lettura» è banale: leggi due  $\text{bit}_m$ , identificali, e quindi prosegui con i successivi.

È una scelta efficiente dal punto di vista informazionale? Una successione di 100 entità di informazione richiederebbe evidentemente 200  $\text{bit}_m$ : è possibile ridurre questo valore?

Prendiamo in esame a questo scopo una diversa funzione per associare successioni di entità di informazione elementari a entità di informazione:

$0 \rightarrow e_1$   
 $10 \rightarrow e_2$   
 $110 \rightarrow e_3$   
 $111 \rightarrow e_4$

per cui per esempio la successione  $e_1e_2e_1$  verrebbe portata dal supporto:

○ ● ○ ○ ○

identificato in 0100. Questa seconda funzione di associazione è operativamente accettabile solo se esiste un'opportuna regola di lettura tale da rendere univoca la corrispondenza tra successioni di entità di informazione elementari e successioni di entità di informazione. Tale regola esiste, anche se è più complessa di quanto non fosse nel caso precedente. Scriviamola nella forma di algoritmo:

considerando il supporto dal primo  $\text{bit}_m$  e fino a che il supporto non è stato interamente considerato:

leggi un  $\text{bit}_m$   
 se il  $\text{bit}_m$  letto è identificato come 0  
 associa  $e_1$  quindi ricomincia

altrimenti  
 leggi il bit<sub>m</sub> successivo  
 se il bit<sub>m</sub> letto è identificato come 0  
 associa  $e_2$  quindi ricomincia  
 altrimenti  
 leggi il bit<sub>m</sub> successivo  
 se il bit<sub>m</sub> letto è identificato come 0  
 associa  $e_3$   
 altrimenti  
 associa  $e_4$  e ricomincia

Si può verificare con facilità che questo algoritmo consente ancora di identificare in modo non ambiguo le entità di informazione. Quanti bit<sub>m</sub> sono necessari in questo caso per identificare una successione di 100 entità di informazione? Si tratta, evidentemente, di numero variabile tra 100 bit<sub>m</sub>, nel caso di una successione costituita di soli  $e_1$ , e 300 bit<sub>m</sub>, nel caso di una successione costituita di soli  $e_3$  ed  $e_4$ . È una funzione di associazione preferibile alla precedente, che richiedeva 200 bit<sub>m</sub>? Per rispondere a questa domanda calcoliamo il *numero medio* di bit<sub>m</sub> necessari per identificare un'entità di informazione, sulla base della distribuzione di probabilità specificata nello schema E:

$$\begin{aligned} \sum p_i \times \text{numero di bit}_m \text{ necessari per } e_i &= \\ &= \frac{1}{2} \times 1 + \frac{1}{4} \times 2 + 2 \times \frac{1}{8} \times 3 = \\ &= 1,75 \text{ bit}_m \text{ medi per entità di informazione} \end{aligned}$$

così che il numero medio di bit<sub>m</sub> necessario per identificare la successione di 100 entità di informazione è pari a 175, un valore sensibilmente inferiore rispetto al precedente.

La sostituzione della prima con la seconda funzione di associazione si presenta dunque come una *compressione del supporto*, che ne consente un uso più efficiente al prezzo di un incremento nella complessità della funzione di associazione stessa.

*Appendice 2**Un esempio di applicazione dei limiti fondamentali*

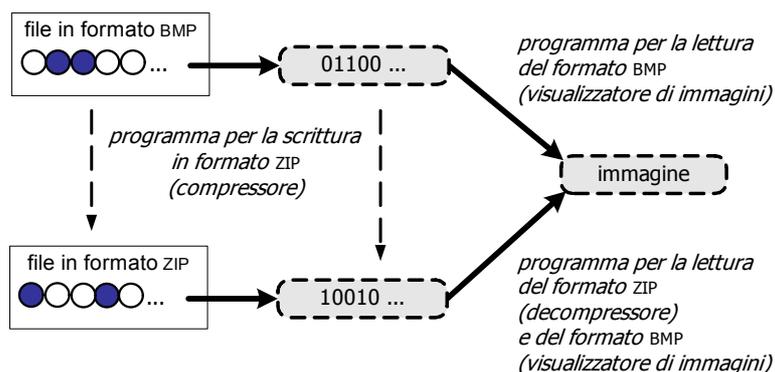
Consideriamo le seguenti due immagini, entrambe gestite mediante calcolatore nella forma di una matrice di  $100 \times 100$  punti, il colore di ognuno dei quali è scelto tra  $2^{24}$  colori possibili:



Il supporto (replicato) per tali entità di informazione è un file, cioè una successione di  $\text{bit}_m$ , e la funzione di associazione è specificata dal *formato* impiegato per memorizzare ogni immagine in un file. Se si adotta la funzione di associazione che impiega  $24 \text{ bit}_m$ , cioè 3 byte (si definisce byte una successione di 8 bit), per ogni punto (per esempio utilizzando il formato BMP per memorizzare le immagini), entrambe le immagini richiedono un supporto di  $100 \times 100 \times 3 = 30000 \text{ byte} \approx 30 \text{ Kbyte}$ .

D'altra parte, la quantità di informazione presente nelle due immagini è anche intuitivamente ben diversa, come emerge dal diverso modo con cui esse potrebbero essere descritte a un interlocutore umano. Nel caso della prima immagine: «si tratta di una matrice  $100 \times 100$  i cui punti sono tutti di uno stesso colore...». Nel caso della seconda immagine: «si tratta di una matrice  $100 \times 100$ ; il primo punto è di colore...; il secondo punto è di colore...;...».

Questa differenza si manifesta chiaramente applicando ai due file in formato BMP un programma di compressione (per esempio in grado di generare due file in formato ZIP), e quindi modificando corrispondentemente la funzione di associazione:



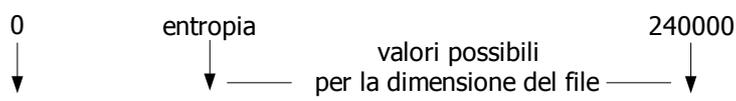
I due file risultanti hanno dimensioni significativamente diverse: meno di 200 byte per la prima immagine, circa 29500 byte per la seconda (questi valori sono stati ottenuti empiricamente, applicando un programma di compressione ai due file). Dunque la compressione ha prodotto nel primo caso una riduzione rilevante, mentre nel secondo caso il file è risultato pressoché «incomprimibile».

Ciò è espressivamente interpretabile in termini dell'entropia delle due immagini e della capacità del supporto impiegato, cioè in riferimento a quelli che abbiamo identificato come i due limiti fondamentali della relazione tra supporti ed entità di informazione.

Dato che la capacità del supporto è pari a  $30000 \times 8 = 240000$  bit (ricordiamo ancora: 1 byte = 8 bit), l'entropia di una generica immagine con le caratteristiche specificate assume un valore tra 0 e 240000 bit:



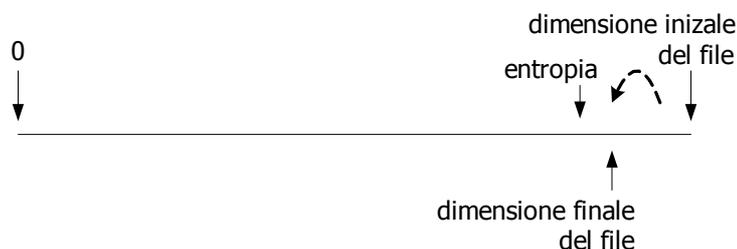
Tale valore è dunque il limite inferiore alla dimensione del file che memorizza l'immagine:



Per entrambe le immagini, i file iniziali avevano una dimensione pari alla capacità del supporto e l'entropia, che pure non calcoliamo, può essere stimata non molto inferiore alla dimensione del file ottenuto applicando il programma di compressione (di cui in questo modo riconosciamo la qualità...). Dunque nel caso della prima immagine:



mentre per la seconda:



Il caso estremo è quello di un'immagine in cui ogni punto ha un colore scelto in modo causale, e ognuno dei  $2^{24}$  dei colori possibili ha una probabilità di essere scelto pari a  $1/2^{24}$ : in questa situazione l'entropia dell'immagine e la capacità del supporto risultano uguali, e dunque nessuna compressione è possibile.

PARTE SECONDA  
(ANALOGICO E) DIGITALE

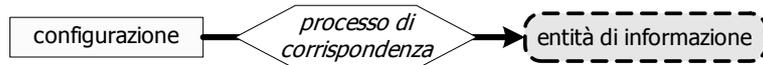


## CAPITOLO SETTIMO

### INFORMAZIONE: NON SOLO MOLTEPLICITÀ

A partire dalla caratterizzazione qualitativa e quantitativa che ci siamo dati per il concetto di informazione, possiamo ora fare un passo ulteriore nell'analisi dei requisiti che un sistema deve soddisfare per essere impiegato come supporto per informazione.

La condizione (necessaria, come si è discusso) relativa alla molteplicità delle configurazioni è in effetti ancora solo formale, dato che prescinde da qualsiasi considerazione circa le caratteristiche specifiche del sistema, e richiede appunto solo che il numero di configurazioni che il sistema può assumere sia sufficiente a mantenere la distinzione tra le entità di informazione da identificare. Se introduciamo esplicitamente il *processo di corrispondenza* con cui le configurazioni del supporto vengono interpretate in termini di entità di informazione:



ottenendo così nuovamente in forma esplicita quello che avevamo chiamato un *sistema informazionale*, ne possiamo concludere che tale processo è formalizzabile come una *funzione* dall'insieme delle configurazioni all'insieme delle entità di informazione (in pratica: ogni configurazione identifica una e una sola entità di informazione). Una volta che sia stato stabilito uno specifico insieme di entità di informazione, questa condizione lascia dunque ampia libertà nella scelta del sistema da usare come supporto e del relativo processo di corrispondenza.

A un primo criterio di scelta abbiamo già fatto riferimento: le entità di informazione possono essere identificate mediante un sistema con un numero di configurazioni almeno pari al numero di entità di informazione da identificare, oppure im-

piegando un sistema con un numero anche ridotto di configurazioni, per esempio un  $\text{bit}_m$ , ma replicabile.

Se, per esempio (utilizzeremo, qui e in seguito, l'esempio non informatico dei segnali stradali per testimoniare la generalità delle nostre considerazioni), le entità di informazione che si intende identificare sono della forma «transito riservato a  $x$ », dove  $x$  è «pedoni», «biciclette», ..., potremo impiegare configurazioni del tipo:



con ciò adottando un supporto a configurazioni non replicate. Ma se occorre ampliare l'insieme delle entità di informazione, includendo in esso anche elementi come «transito riservato a  $x_1$  e  $x_2$ », dove  $x_1$  e  $x_2$  sono scelti dall'insieme precedente, invece di inventare un simbolo ad hoc per ogni possibile coppia potremo scegliere di replicare il supporto, in una delle due configurazioni informazionalmente equivalenti:



La replica del supporto consente, anche in presenza del nuovo insieme di entità di informazione, di mantenere sostanzialmente il precedente processo di corrispondenza, un beneficio che compensa la maggiore complessità del supporto adottato.

Una volta che questa condizione sia stata soddisfatta (ottenendo la molteplicità necessaria attraverso un processo di replica o meno), ci si può finalmente porre il problema, complementare al precedente ma ben più importante e critico di questo, del *criterio in base a cui le configurazioni del supporto identificano le entità di informazione*.

In termini generali, tale criterio può essere fondato su una condizione di pura convenzione, così che l'unico requisito posto

sulle configurazioni rimarrebbe la loro distinguibilità. Se, per esempio, si dovessero identificare le entità di informazione «divieto» e «attenzione», si potrebbero scegliere le configurazioni:



rispettivamente. D'altra parte, data l'evidente convenzionalità di questa corrispondenza, anche la scelta inversa, il primo segnale come identificatore di attenzione e il secondo di divieto, sarebbe altrettanto possibile.

Diversa, e comunque più specifica, è la situazione in cui le entità di informazione *dispongono di una struttura interna* tale da poter essere riportata per analogia nella struttura interna delle configurazioni di un supporto. Esempi di questa situazione sono i segnali:



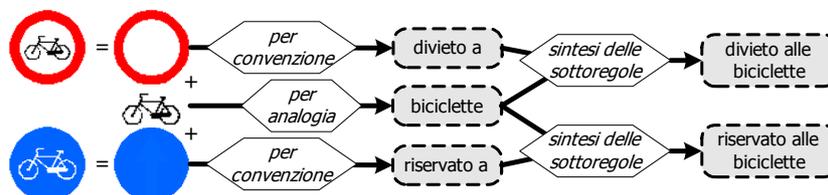
che richiamano, appunto per analogia dovuta alla presenza di raffigurazioni, le rispettive entità di informazione «è qui disponibile un telefono pubblico», «è qui disponibile un distributore di benzina».

Queste due modalità, corrispondenza per convenzione e per analogia, sono concettualmente distinte ma possono essere impiegate congiuntamente. Il processo con cui le configurazioni del supporto vengono fatte corrispondere alle entità di informazione può essere infatti composito, e includere una componente convenzionale e una basata sull'analogia tra struttura della configurazione e struttura dell'entità di informazione. Un caso tipico è il seguente:



in cui la componente convenzionale è diversa (le entità di informazione «divieto a  $x$ » e «riservato a  $x$ » (sup)portate da cerchi colorati in modi diversi), mentre l'identificazione per analogia è evidentemente la stessa ( $x$ =biciclette).

Si tratta, in sostanza, di un caso di supporto replicato, interpretabile così:



Il fatto che la corrispondenza per analogia sia interpretabile come un caso particolare della corrispondenza per convenzione (in fondo l'analogia è interpretabile come una forma, particolare, di convenzione...) si manifesta nelle situazioni in cui una configurazione apparentemente scelta in base a ragioni di analogia non è comunque più in grado di richiamare la corrispondente entità di informazione sulla base dell'analogia in questione. Esempi potrebbero essere:



il primo perché si potrebbe non sapere dell'esistenza di ponti levatoi, il secondo per l'ambiguità dell'analogia implicata (la soggettività di questi giudizi non solo non indebolisce l'ipotesi che l'analogia dipenda da pre-assunzioni di natura convenzionale, ma anzi la rafforza).

Anche in situazioni di questo genere, il supporto mantiene intatta la sua capacità di identificare entità di informazione, e quindi di portare informazione, sulla base di un processo di corrispondenza che rimane puramente convenzionale.

*Digitale e analogico?*

La distinzione che abbiamo evidenziato tra corrispondenza per convenzione e corrispondenza per analogia viene sintetizzata, a volte, in termini dell'opposizione tra digitale e analogico.

Per esempio, mentre il disegno di un tavolo identifica il tavolo disegnato attraverso un'analogia, la corrispondenza tra il sostantivo «tavolo», scritto o pronunciato, e gli oggetti fisici generalmente denotati da tale sostantivo è solo convenzionale, dato che nessuna caratteristica propria delle cose-tavoli è presente nel sostantivo «tavolo» (se ci fossero dubbi a questo proposito si potrebbe considerare l'insensatezza della domanda se sia più corretto chiamare i tavoli «tavoli» o «tables»). In questo senso, il processo con cui il sostantivo viene fatto corrispondere all'oggetto fisico sarebbe «digitale».

Una nota terminologica: il fatto che una consolidata tradizione italiana proponga la sinonimia di «digitale» e «numerico» crea una certa implausibilità terminologica (cosa c'è di numerico nel sostantivo «tavolo»? ). Ma è a questioni semantiche, e non lessicali, che siamo interessati qui: per chiarire che stiamo discutendo un uso dei termini che in seguito modificheremo parzialmente, scriveremo comunque «digitale\*» e «analogico\*» per indicare queste accezioni.

Facciamo qualche riflessione su questa ipotesi di denominazione.

Per prima cosa, dobbiamo ribadire che, a rigore, l'analogico\* sarebbe un caso particolare del digitale\*, proprio nel senso suddetto che l'analogia è una particolare convenzione. C'è dunque da supporre che l'impiego del termine digitale\* che stiamo discutendo sia in effetti più specifico, e riguardi non ogni possibile convenzione ma solo quelle per così dire «non basate su analogia». Si tratterebbe perciò di una definizione in negativo, che complementa quella di analogico\* per differenza.

Ma, ricordando l'attuale «mito del digitale», *cosa ci sarebbe di sbagliato* nell'analogico? Dopo tutto, l'impiego di un'analogia facilita l'apprendimento e la memorizzazione del processo di corrispondenza, e alla fine può sempre trasformarsi in una pura convenzione per coloro che non sono in grado di interpretare l'analogia stessa. In funzione dello stato di conoscenza del sog-

getto, un processo analogico\* potrebbe essere inteso come digitale\*, mentre un processo digitale\* non potrebbe essere che tale. In questi termini, l'analogico\* sembrerebbe preferibile al digitale\*.

Gli esempi appena proposti riguardo ai segnali stradali paiono confermare questa ipotesi: viene utilizzato ovunque l'analogico\* salvo nei casi in cui le entità di informazione sono talmente astratte da non consentire una ragionevole identificazione per analogia. Ne sono esempi i citati concetti di divieto e obbligo, ma anche i casi di negazione, come:



Che il digitale e l'analogico abbiano attinenze con lo stabilire corrispondenze rispettivamente in modo (solo) convenzionale e per analogia è fuori di dubbio. Ma è davvero arduo immaginare che questa accezione riesca a spiegare le attuali *ragioni del digitale*.

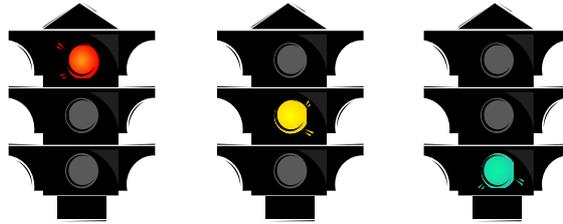
## CAPITOLO OTTAVO

### INFORMAZIONE: NON SOLO IDENTIFICAZIONE

*A cosa serve (nel senso di: per cosa può essere usata) l'informazione portata dalla configurazione di un supporto?*

Il concetto di informazione che abbiamo introdotto e discusso finora è fondato sull'identificazione, e quindi sulla possibilità di distinzione: *è questo, ma avrebbe potuto essere quest'altro*. Si tratta, in questi termini, di informazione di tipo puramente classificatorio, e infatti, come abbiamo discusso, al supporto è solo richiesto che sia in grado di mantenere distinte le configurazioni che identificano entità di informazione diverse.

Per esempio, fino a che le tre configurazioni:



rimangono reciprocamente distinte, il semaforo può assumere molti stati fisici differenti (rosso più o meno intenso, giallo continuo o lampeggiante, ...) e pure rimanere adeguato in quanto supporto per l'insieme delle entità di informazione a esso usualmente associato: «fermati!», «attento!», «passa pure!».

(Si potrebbe notare che in questo supporto più caratteristiche concorrono a costituire una configurazione; l'entità di informazione «fermati!», per esempio, è (sup)portata sia da «luce rossa» sia da «luce accesa in alto»; qualora questa ridondanza venisse rimossa, come nel caso di un semaforo con una luce rossa accesa nella posizione bassa, si genererebbe in questo senso un'ambiguità, che potrebbe essere risolta solo decidendo un cri-

terio di prevalenza tra caratteristiche, per esempio del tipo «anche se la luce accesa è quella in basso, la luce è rossa e perciò il supporto identifica l'entità di informazione 'fermati!'»).

L'informazione con cui abbiamo abitualmente a che fare è però spesso *più che classificatoria*: consente non solo di mantenere distinzioni, ma anche, per esempio, di stabilire tra entità distinte una relazione d'ordine (*questo è maggiore di quest'altro*) oppure una metrica (*questo è distante un certo valore da quest'altro*, nel senso di *l'intervallo che separa questo da quest'altro ha una certa ampiezza*).

Questi segnali, per esempio:



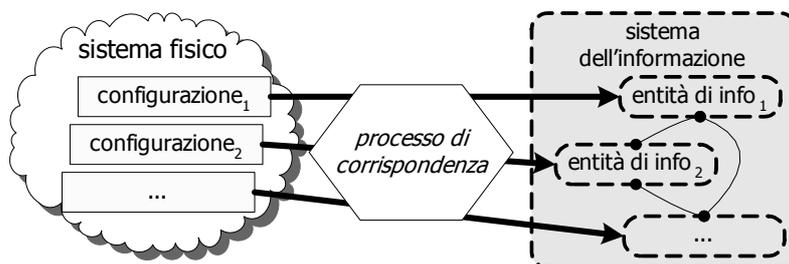
accanto a un'informazione di tipo classificatorio portano certamente anche un'informazione di tipo sia ordinale sia metrico. Non solo, infatti, i limiti di velocità identificati dai due segnali sono *diversi*, ma il limite identificato dal primo segnale è *inferiore* a quello identificato dal secondo, e la *distanza* tra i due limiti è stabilita. E così, incontrando il secondo segnale dopo il primo, otteniamo l'informazione non solo che possiamo genericamente variare la velocità dell'auto che stiamo guidando (informazione classificatoria, cioè di distinzione), ma, più specificamente, che la possiamo aumentare (informazione ordinale) e che la possiamo aumentare incrementandola fino a 50 km/h in più del limite precedente (informazione metrica).

La presenza di un ordine o una metrica, che algebricamente sono formalizzabili come delle relazioni, arricchisce l'insieme delle entità di informazione di una *struttura relazionale*, cioè di informazione sul «cosa si può fare» con le entità di informazione dell'insieme. Si tratta dunque di informazione su informazione, che può essere chiamata *meta-informazione*, e in presenza della quale l'insieme delle entità di informazione diventa un *sistema*, cioè appunto un insieme-con-struttura.

Il problema considerato in precedenza relativamente alle condizioni che un sistema fisico deve soddisfare per poter essere usato come supporto per informazione *si ripropone a proposito della meta-informazione*. Come abbiamo già notato, nessuna ope-

razione su entità di informazione può essere compiuta a prescindere da un supporto fisico, e anzi ogni operazione viene realizzata su configurazioni di supporti, per essere quindi interpretata in termini di entità di informazione grazie all'univocità della funzione di identificazione. La presenza di meta-informazione sollecita allora il nuovo problema di come fare in modo che le configurazioni del supporto siano in grado di (sup)portare non solo informazione ma anche meta-informazione, così che l'accesso alle configurazioni (sup)porti informazione non solo di identificazione ma anche, per esempio, di ordine o metrica.

Si tratta dunque di chiarire le condizioni che consentono a un sistema fisico di fungere da supporto nel caso:



avendo raffigurato con i segmenti  $\bullet \text{---} \bullet$  all'interno del *sistema dell'informazione* la meta-informazione definita tra le entità di informazione del sistema stesso.

*Per come l'abbiamo delineato, questo problema è sostanzialmente l'inverso (potremmo dire: l'altra faccia della stessa medaglia) di quello che potrebbe essere chiamato il problema generale della misurazione. Rimandiamo all'Appendice 1 di questa Parte per una breve analisi al riguardo.*

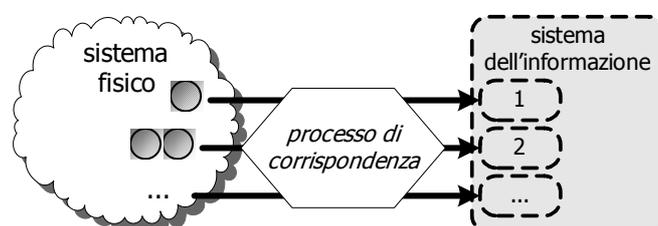
#### *Due strategie di soluzione*

Per risolvere il problema di supportare meta-informazione si possono identificare due diverse strategie di soluzione.

- Prima strategia: *meta-informazione esplicita nel supporto*. Si adotta un supporto sull'insieme delle cui configurazioni sono

empiricamente definite relazioni che possono essere messe in corrispondenza con quelle presenti tra entità di informazione. In questo modo ogni configurazione del supporto non solo identifica un'entità di informazione, ma anche risulta immersa in una struttura relazionale che corrisponde a quella presente tra entità di informazione.

Per esempio per identificare dei numeri, cioè le entità di informazione 1, 2, 3, ... e (sup)portare la relativa metainformazione ordinale (per semplicità limitiamoci a questa; naturalmente tra numeri è definita anche una metrica), potrebbero essere scelte le configurazioni  $\bigcirc$ ,  $\bigcirc\bigcirc$ ,  $\bigcirc\bigcirc\bigcirc$ , ... rispettivamente, poiché tra tali configurazioni è stabilita una relazione di «ordine empirico» corrispondente alla usuale relazione di «ordine simbolico» tra numeri:

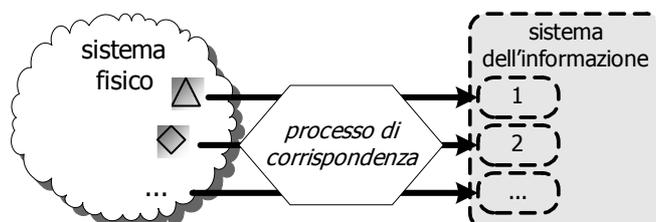


Grazie alla nostra conoscenza delle modalità di realizzazione di questo ordine empirico, sappiamo per esempio che la configurazione  $\bigcirc\bigcirc$  è «empiricamente maggiore» della configurazione  $\bigcirc$ . Il processo di corrispondenza viene allora definito in modo da *conservare* la struttura relazionale presente sul suo dominio: se la configurazione  $c_1$  è empiricamente maggiore della configurazione  $c_2$ , allora l'entità di informazione  $e_1$  (sup)portata da  $c_1$  sarà simbolicamente maggiore dell'entità di informazione  $e_2$  (sup)portata da  $c_2$ . In questo modo, accedendo al supporto  $\bigcirc\bigcirc$  si può concludere non solo che l'entità di informazione da esso identificata è diversa di quella identificata da  $\bigcirc$ , ma anche che è maggiore di quest'ultima.

- Seconda strategia: *meta-informazione implicita nel processo di corrispondenza*. Si continua a impiegare un supporto sull'insieme delle cui configurazioni è posto come unico vin-

colo la condizione di molteplicità, e per supportare la meta-informazione si definisce in modo esplicito il processo di corrispondenza, specificando dunque per ogni configurazione l'entità di informazione corrispondente.

Riprendendo l'esempio precedente, in accordo a questa strategia si potrebbero scegliere il sistema fisico e il processo di corrispondenza in questo modo:



Dalla sola osservazione delle configurazioni,  $\triangle$ ,  $\diamond$ , ... non si può evidentemente inferire alcunché circa la meta-informazione da esse portata: non è dato a priori un criterio secondo cui  $\triangle$  è empiricamente minore o maggiore di  $\diamond$ . È dunque solo attraverso la conoscenza esplicita del processo di corrispondenza che le configurazioni del supporto implicitamente supportano la meta-informazione definita sulle entità di informazione identificate.

La differenza fra queste strategie è relativa dunque al *modo con cui si definisce il processo di corrispondenza*:

- nel caso della prima strategia, la corrispondenza è definita *in modo intensionale*, cioè in forma analitica e in termini delle proprietà che le relazioni soddisfano;
- nel caso della seconda strategia, la corrispondenza è definita *in modo estensionale*, cioè mediante l'elencazione di tutte le coppie (configurazione del supporto, entità di informazione).

*Un esempio*

Dopo aver corretto un compito scritto sostenuto da un gruppo di studenti, vogliamo comunicare a ognuno il voto con cui è stata valutata la sua prova. Si tratta perciò di scegliere un sistema fisico in grado di supportare entità di informazione che supponiamo essere scelte nell'insieme  $\{1,2,\dots,10\}$ . Evidentemente su tale insieme è definita meta-informazione, e precisamente almeno una relazione di ordine, che consente, per esempio, di dichiarare non solo che 6 è diverso da 5, ma anche che è maggiore, e quindi corrispondente a un risultato migliore, di quest'ultimo.

(Si pone qui in termini meta-informazionali un problema classico: sull'insieme dei voti è definita anche una metrica? Se così fosse, se ne potrebbe concludere non solo che  $n+1$  è maggiore di  $n$ , ma anche che i due voti sono distanti una unità l'uno dall'altro, tanto quanto lo sono  $n+2$  e  $n+1$ , e così via. Il problema ovviamente non è aritmetico ma didattico, cioè attiene, nella nostra terminologia, al mondo empirico e non a quello dell'informazione: è vero che tra i voti identificati come (non i numeri, dunque!) 5 e 6 c'è la *stessa* distanza che intercorre tra, poniamo, i voti identificati come 6 e 7? Si dovrebbe notare che, in assenza di una risposta chiara, e positiva, a questo genere di domande si dovrebbe smettere di calcolare la media di un insieme di voti, dato che tale operazione implica appunto la presenza di una metrica tra i valori mediati. È questo un esempio dei problemi trattati dalla cosiddetta *teoria delle scale di misura*, argomento su cui non ci dilunghiamo ulteriormente qui e che verrà più ampiamente trattato nell'Appendice 1 di questa Parte).

Ecco due possibili soluzioni per comunicare il voto  $n$  con cui è stato valutato il compito di uno studente:

*soluzione 1:* si presentano allo studente  $n$  grammi di sabbia;

*soluzione 2:* si presenta allo studente un oggetto che avevamo precedentemente concordato identificare il voto  $n$ .

Allo scopo di evidenziare le differenze strutturali di queste due soluzioni, confrontiamole rispetto a due problemi operativi.

Il *primo* problema è quello fondamentale: come comunicare il processo di corrispondenza, in modo che ogni studente sia in grado di identificare correttamente il voto con cui è stato valutato il suo compito a partire dall'osservazione del supporto fisico?

La soluzione 1 ammette una comunicazione di tipo intensionale; per esempio il docente potrebbe informare: « presenterò a ogni studente  $n$  grammi di sabbia per comunicargli che il voto del suo compito è  $n$  ». Nel caso della soluzione 2, invece, è necessaria una comunicazione di tipo estensionale, del tipo « presenterò a ogni studente questo oggetto per comunicargli che il voto del suo compito è 1, quest'altro oggetto per comunicargli che il voto è 2, quest'altro oggetto ancora per... ». Relativamente alle modalità di soluzione di questo primo problema, la soluzione 1 appare quindi più sofisticata, se non altro perché più efficiente, della soluzione 2. Si può inoltre notare che la soluzione 1 è più specifica della soluzione 2, e quindi riconducibile a un caso particolare di quest'ultima: una comunicazione estensionale come quella adottata nella soluzione 2 è infatti possibile, benché certamente non necessaria, anche per la soluzione 1.

Il *secondo* problema è il seguente: cosa fare se, dopo aver stabilito un supporto fisico e un processo di corrispondenza (e, supponiamo, averli già comunicati agli studenti), si decide di modificare l'insieme delle entità di informazione da identificare, per esempio perché si sceglie di valutare i compiti utilizzando anche « mezzi voti » come  $5\frac{1}{2}$ ?

La soluzione 1 risulta immediatamente applicabile, così che, per esempio, a uno studente presenteremo 5,5 grammi di sabbia per comunicargli il voto  $5\frac{1}{2}$ . Nel caso della soluzione 2, invece, siamo costretti ad aumentare il numero di oggetti con cui identifichiamo i voti, estendendo in conseguenza il processo di corrispondenza, che deve essere ridefinito in modo ancora estensionale. Anche a proposito delle modalità di soluzione del secondo problema, dunque, la soluzione 1 appare ancora più sofisticata della soluzione 2.

Schematicamente, dunque:

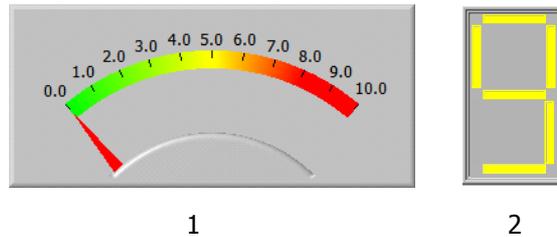
	Modalità di definizione del processo di corrispondenza	Ridefinizione del processo di corrispondenza al variare dell'insieme delle entità di informazione
Soluzione 1	intensionale	nessuna ridefinizione è necessaria
Soluzione 2	estensionale	occorre estendere esplicitamente il processo definito in precedenza

Si dovrebbe notare che queste differenze tra le due soluzioni si fondano sul fatto che la struttura dell'insieme delle entità di informazione viene utilizzata nella definizione del processo di corrispondenza solo nel caso della soluzione 1: la soluzione 2 prescinde totalmente dalla presenza di tale struttura. Ne possiamo concludere che le due soluzioni sono un esempio delle due strategie presentate in precedenza, rispettivamente di meta-informazione esplicita nel supporto e di meta-informazione implicita nel processo di corrispondenza.

## CAPITOLO NONO

### ANALOGICO E DIGITALE

Nella loro *logica di realizzazione* del processo di corrispondenza, le due soluzioni discusse nell'esempio del Capitolo precedente sono affini rispettivamente ai seguenti dispositivi:



e cioè a (1) un usuale indicatore ad ago su una scala graduata, e (2) un dispositivo di visualizzazione per cifre.

Il primo dispositivo consente l'identificazione di entità di informazione attraverso la variazione continua delle configurazioni del supporto, per cui si può stabilire una corrispondenza biunivoca (e più propriamente quello che si chiama un isomorfismo) tra quantità di sabbia presentate agli studenti e posizioni angolari dell'ago sulla scala. Nel caso del secondo dispositivo, le entità di informazione vengono invece identificate mediante configurazioni discrete, *pattern* di segmenti illuminati che corrispondono agli oggetti presentati agli studenti nell'esempio precedente.

Questa analogia ci suggerisce di chiamare le due strategie di soluzione presentate nel Capitolo precedente rispettivamente *analogica* e *digitale*, dunque sulla base delle sinonimie:

- analogico: meta-informazione esplicita nel supporto;
- digitale: meta-informazione implicita nel processo di corrispondenza

(per chiarezza espositiva, nelle prossime righe prendiamo in esame quelli che potrebbero essere chiamati «casi estremi» di analogico e di digitale; vedremo successivamente in che senso siano possibili delle strategie intermedie).

Cerchiamo ora di generalizzare quanto abbiamo considerato nell'esempio precedente, proseguendo nel confronto delle due strategie a partire da cinque parametri di confronto, che riprendono, specificandoli, i due problemi discussi al termine del Capitolo precedente.

- A. *Modalità di definizione del processo di corrispondenza*: come abbiamo visto nell'esempio, l'analogico si basa tipicamente su una definizione intensionale (nel caso in cui l'insieme delle entità di informazione sia finito, l'analogico ammette anche una definizione estensionale: tralasciamo comunque per ora questo caso, in cui l'analogico viene utilizzato «come se fosse» digitale), mentre il digitale, a causa della necessità di elencare esplicitamente le corrispondenze tra configurazioni ed entità di informazione, non può che essere basato su definizioni estensionali.
- B. *Ridefinizione del processo di corrispondenza al variare dell'insieme delle entità di informazione*: ancora l'esempio ha messo in evidenza la profonda differenza tra le due strategie. L'analogico non impone alcun intervento (o al più una rispecificazione intensionale) sul processo di corrispondenza e con ciò si manifesta assai più flessibile del digitale, che invece richiede una ridefinizione del processo stesso, o quantomeno una sua estensione che consenta l'identificazione delle nuove entità di informazione.
- C. *Applicabilità in funzione della cardinalità dell'insieme delle entità di informazione*: grazie alla possibilità di definizione intensionale del processo di corrispondenza, l'analogico è di principio applicabile più ampiamente del digitale, dato che può essere impiegato anche nel caso in cui le entità di informazione non siano stabilite, o comunque non siano in numero limitato, a priori. Nuovamente, il fatto di dover definire il processo di corrispondenza in modo estensionale rende invece il digitale applicabile solo nel caso di insiemi di entità di informazione a cardinalità finita e i cui elementi sono noti a priori.

- D. *Applicabilità in funzione della struttura dell'insieme delle entità di informazione*: analogico e digitale manifestano, a questo riguardo, la loro opposizione nel modo più evidente. Se sull'insieme delle entità di informazione è assente qualsiasi struttura (cioè non è definita meta-informazione), l'unico modo per definire il processo di corrispondenza è estensionale. In tal caso, di analogico non si può, propriamente, parlare, e la strategia per consentire a un sistema fisico di fungere da supporto è unica: il digitale. D'altra parte, anche in presenza di una struttura, il digitale opera come se tale struttura fosse assente, prescindendo da essa nella definizione del processo di corrispondenza. In questo, perciò, il digitale risulta applicabile in modo più generale rispetto all'analogico.
- E. *Condizioni sul supporto*: l'applicabilità effettiva dell'analogico dipende dalla disponibilità di un supporto in grado di ricreare tra le sue configurazioni una struttura corrispondente a quella presente sull'insieme delle entità di informazione. Nel caso del digitale, invece, l'unica condizione posta sul supporto riguarda il vincolo che abbiamo chiamato di molteplicità (che naturalmente deve essere comunque soddisfatto anche nel caso analogico): la cardinalità dell'insieme delle configurazioni deve essere sufficiente a identificare tutte le entità di informazione.

Schematicamente:

Strategia	A. Modalità di definizione del processo di corrispondenza	B. Ridefinizione del processo di corrispondenza al variare dell'insieme delle entità di informazione	C. Applicabilità in funzione della cardinalità dell'insieme delle entità di informazione
Analogico	intensionale	nessuna ridefinizione è necessaria	applicabile anche per cardinalità non finita
Digitale	estensionale	occorre estendere il processo definito in precedenza	applicabile solo per cardinalità finita e con entità note a priori

Strategia	D. Applicabilità in funzione della struttura dell'insieme delle entità di informazione	E. Condizioni sul supporto
Analogico	applicabile solo se una struttura è presente	applicabile solo con supporti dotati di struttura
Digitale	applicabile in ogni caso	applicabile in ogni caso

*Un inserto epistemologico*

Abbiamo introdotto nel Capitolo precedente la questione dei criteri adottabili per stabilire la correttezza di un processo di corrispondenza, notando come, a fronte di una generale base convenzionale di tali processi, si possano comunque presentare situazioni in cui la corrispondenza non è *solo* convenzionale. Questa eventuale non convenzionalità deriverebbe, così avevamo considerato, dal fatto che le entità di informazione da identificare siano dotate di una struttura, che rende conto dunque di ciò che abbiamo chiamato «corrispondenza per analogia». Mentre i processi di corrispondenza digitali non possono che essere convenzionali, quelli analogici possono dunque essere basati su conoscenze *di sfondo* (come quelle che consentono di sostenere che  $\bigcirc\bigcirc$  è «empiricamente maggiore» di  $\bigcirc$ ), e in questo senso non convenzionali.

È interessante accennare almeno a un'importante conseguenza di questa caratterizzazione, a proposito del concetto di *verità*. «Vero è dire di ciò che è che è e di ciò che non è che non è», dove il «dire» di cui si tratta potrebbe essere inteso in un senso lato, includendo per esempio anche il produrre immagini: come «quella neve è bianca» è vero se e solo se la neve a cui la proposizione è riferita è bianca, così il disegno di un tavolo grande è vero (e meglio: porta un'informazione veritiera) se l'entità che identifica è un tavolo e tale tavolo è considerato grande da coloro che condividono l'informazione. Dunque la verità è una proprietà di cose in quanto cose-identificatori, è cioè una proprietà referenziale.

(Per contrapposizione, si consideri il caso di «'la neve è bianca' è una proposizione di 4 parole», in cui la proprietà, «essere di 4

parole», è riferita alla proposizione in quanto tale; i linguaggi semanticamente non chiusi, come l'italiano, consentono non solo di identificare cose che sono parte della materia/energia, ma anche di trattare il mondo dell'informazione come oggetto di identificazione, fino al caso estremo di saper produrre identificatori che identificano se stessi, come «questa frase è falsa». Sono noti i problemi che questa auto-referenzialità genera, icasticamente rappresentati in molte opere di Escher, nonché le soluzioni proposte, per esempio in termini di una distinzione tra livello linguistico e livello meta-linguistico).

Posto che l'essere vero o falso di un identificatore dipende dal processo di corrispondenza adottato, e che l'essere digitale o analogico è una proprietà dei processi di corrispondenza, possiamo sensatamente porci il problema: *il digitale fonda, o è fondato su, un concetto di verità diverso da quello proprio dell'analogico?*

Lasciamo ad altri una risposta generale a questo complesso quesito. Ci accontentiamo qui di una semplice considerazione, a partire da un esempio relativo a situazioni in cui il processo di corrispondenza tra identificatore e cosa identificata viene gestito da un dispositivo tecnologico, la qualità del cui funzionamento è dunque condizione di correttezza per il processo stesso. Di fronte a una cosa con funzione di identificatore, potrebbe essere la fotografia di un evento o la registrazione di un dialogo, ci chiediamo: «è vera?». Cioè: quello che si vede nella fotografia (o si ascolta nella registrazione) corrisponde a qualcosa di realmente accaduto? In altri termini: la fotografia è un «originale» o è stata «ritoccata»? Evidentemente il problema è tale solo nel caso in cui il soggetto chiamato a dare una risposta debba inferire sulla verità del supporto senza poter partecipare al momento in cui viene prodotta la fotografia, cioè in assenza di un accesso diretto al processo di corrispondenza da cui il supporto in questione è stato ottenuto.

Una prima distinzione tra una fotografia digitale e una analogica (stiamo adottando ovviamente una terminologia ellittica, a indicare una fotografia ottenuta mediante un processo di corrispondenza digitale / analogico) sta nel fatto che la prima è (basata su) un supporto inevitabilmente replicato, i cui supporti elementari sono i singoli punti dell'immagine, chiamati abi-

tualmente *pixel*, contrazione di *picture element*, mentre una fotografia analogica, a meno di non spingersi alla risoluzione della sua grana, si presenta come un supporto singolo, in cui è eventualmente solo l'interpretazione del soggetto umano a riconoscere una struttura interna, dovuta alla raffigurazione di cose nella scena. La continuità che si assume propria della scena fotografata (anche a questo proposito, stiamo ovviamente pensando a fotografie riprese in una scala non così microscopica da far intervenire effetti dovuti alla struttura discreta della materia) si trasferisce dunque come condizione necessaria alla fotografia analogica. È questa la ragione concettualmente alla base della possibilità di riconoscere fotografie contraffatte a causa di fotomontaggi che abbiano introdotto delle discretizzazioni, come è tipico nel caso dell'accostamento di aree il cui colore varia bruscamente lungo la linea di contatto.

Dal nostro punto di vista, è comunque ben più importante una seconda ragione che differenzia i due tipi di fotografie. Mentre possiamo dire che una fotografia analogica è il suo supporto, nel senso che è un rettangolo di carta fotografica sviluppata, una fotografia digitale è contemporaneamente il file che memorizza la scena che è stata ripresa e l'algoritmo che consente di interpretare il contenuto del file come una matrice rettangolare di pixel. Riprendendo quanto già suggerito in precedenza: nella fotografia analogica la meta-informazione è esplicita nel supporto; nella fotografia digitale è implicita nel processo di corrispondenza, e infatti il file generato da una macchina fotografica digitale per contenere una fotografia potrebbe avere un nome del tipo DCP\_0921.JPG, dove il suffisso, JPG, rimanda appunto al particolare algoritmo con cui il file è stato prodotto e che si suppone verrà usato per visualizzare l'immagine memorizzata: si noti che la presenza del suffisso trasferisce una parte di meta-informazione al supporto. Il supporto tipico di una fotografia digitale è dunque una successione di bit, e propriamente di  $\text{bit}_m$ . Ma, per le relazioni che abbiamo discusso essere presenti tra  $\text{bit}_m$  e  $\text{bit}_i$ , una fotografia digitale è trattabile *come se* fosse un'entità puramente informazionale, con tutto quello che ne consegue in termini di riproducibilità (si perde completamente la distinzione tra «originale» e «copia») e modificabilità.

### *Due estensioni*

Quanto considerato finora a proposito di analogico e digitale si riferisce, in effetti, a casi estremi di queste due strategie, che possono essere realizzate anche con modalità «intermedie». Presentiamo due esempi al riguardo, nuovamente a partire dal problema di comunicare il voto  $n$  con cui è stato valutato il compito di uno studente. Accanto alle due soluzioni considerate in precedenza, che ricordiamo sono:

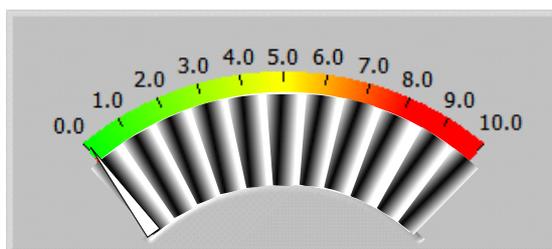
*soluzione 1:* si presentano allo studente  $n$  grammi di sabbia;

*soluzione 2:* si presenta allo studente un oggetto che avevamo precedentemente concordato identificare il voto  $n$ .

una terza opzione è:

*soluzione 3:* si presentano allo studente  $n$  sassolini,

simile, ma non equivalente, alla soluzione 1. La soluzione 3 è analoga nella sua realizzazione a un dispositivo del tipo:



cioè a un indicatore il cui ago sia forzato ad assumere solo alcune posizioni predefinite su una scala graduata e che perciò si muova «a scatti» tra posizioni discrete.

Dal fatto che la comunicazione del processo di corrispondenza può avvenire semplicemente specificando « presenterò a ogni studente  $n$  sassolini per comunicargli che il voto del suo compito è  $n$  » e che esiste un'ovvia analogia tra configurazioni del supporto ed entità di informazione identificate, possiamo inferire come questa soluzione sia basata su una strategia di tipo analogico. La differenza tra le soluzioni 1 e 3 si manifesta allorché si scelga di modificare l'insieme delle entità di informazio-

ne da identificare (cioè a proposito del parametro di confronto B), per esempio perché si introducono anche i «mezzi voti».

Il processo di corrispondenza adottato prescinde dalle dimensioni dei sassolini, che sono trattati come unità atomiche: questa è dunque un'ulteriore differenza con la soluzione 1, in cui non si è ancora giunti alla granularità più fine ammessa dal supporto. La scelta di comunicare il voto  $5\frac{1}{2}$  presentando 5 sassolini e mezzo, avendone cioè diviso uno, non è perciò praticabile, poiché «un mezzo sassolino» in questa logica rimane comunque un sassolino. Occorre perciò cambiare il processo di corrispondenza, per esempio in modo che ogni sassolino identifichi un mezzo punto di voto, così che per comunicare il voto  $5\frac{1}{2}$ , cioè  $5 \times 2 + 1 = 11$  «mezzi punti», presenteremo 11 sassolini. Una volta introdotta questa modifica, il processo di corrispondenza rimane definibile in modo intensionale, cosa che, come abbiamo visto, è tipica dell'analogico. In questa prospettiva, la soluzione 1 è perciò assimilabile a un caso ideale della soluzione 3, in cui non si è ancora giunti alla soglia atomica del supporto, oltre la quale non è più possibile procedere con il raffinamento delle configurazioni. Ciò mostra, inoltre, che quanto abbiamo considerato caratterizzante per l'analogico mantiene sostanzialmente la sua validità anche nel caso di un supporto a configurazioni discrete. Chiameremo perciò la strategia sottostante alla soluzione 3 *analogico discreto*, ribattezzando *analogico ideale* la strategia su cui la soluzione 1 è basata.

Ci si potrebbe chiedere se processi di corrispondenza analogici ideali siano operativamente realizzabili, oppure se questa strategia rimanga appunto solo un caso ideale, e quindi se ogni processo di corrispondenza analogico sia in effetti analogico discreto. Questa domanda *non* è la riproposizione della vecchia questione se sia o meno vero che *natura facit saltus*. La nostra attenzione non è, infatti, sulla *fisica* del supporto, ma sulle sue caratteristiche *informazionali*. E dal punto di vista informativo è rilevante non se un sistema fisico sia continuo o discreto, ma se le sue configurazioni siano o meno in numero sufficiente a identificare le entità di informazione a cui si è interessati. Nel caso in cui la cardinalità dell'insieme delle configurazioni sia sufficiente a questo scopo, il supporto *si comporta come se* fosse continuo, e dunque è ideale per l'uso per cui è stato scelto.

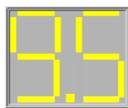
Un'ulteriore soluzione è poi:

*soluzione 4*: presentiamo allo studente due oggetti, che avevamo concordato identificare il primo il giudizio di sufficienza o insufficienza, e il secondo il grado di tale sufficienza o insufficienza,

dunque una versione sofisticata della soluzione 2 (presentare un oggetto che si era concordato identificare il voto  $n$ ).

Discutiamo con un esempio la soluzione 4. Dato l'insieme  $\{1, \dots, 10\}$  dei voti possibili, supponiamo che i due giudizi, sufficiente e insufficiente, siano identificati rispettivamente dagli oggetti:  $\triangle$  e  $\nabla$ . I cinque diversi gradi di sufficienza e insufficienza siano invece identificati (in ordine crescente) rispettivamente da:  $\square$ ,  $\circ$ ,  $\hexagon$ ,  $\diamond$  e  $\pentagon$ . Allora i voti 1, 3 e 6 saranno identificati dalle coppie di oggetti:  $\nabla\square$ ,  $\nabla\hexagon$  e  $\triangle\square$  (per cui per esempio  $\nabla\square$  è interpretabile come un'insufficienza in grado minimo). Si tratta, evidentemente, di una strategia di tipo digitale, basata però sulla replica del supporto: chiameremo perciò la strategia sottostante a tale soluzione *digitale replicato*.

A fronte di una maggiore complessità del processo di corrispondenza e della necessità di impiegare un supporto replicabile, questa strategia consente di ridurre il numero complessivo di configurazioni diverse necessarie (nell'esempio sono 7 invece di 10) rispetto a soluzioni basate sulla strategia digitale. Dal punto di vista del processo di corrispondenza, il digitale replicato è in effetti spesso un ibrido: se, da una parte, l'identificazione da parte delle singole configurazioni elementari è mantenuta mediante un processo convenzionale, quindi digitale, la componente di informazione dovuta alla replicabilità del supporto viene generalmente basata su un processo di corrispondenza definito in modo intensionale. La soluzione 4 è infatti analoga nella sua realizzazione a un dispositivo del tipo:



la cui natura di digitale replicato emerge in modo chiaro.

Al riguardo di questa strategia, rimandiamo a quanto considerato quando abbiamo introdotto il concetto di replica del supporto: è evidente la maggiore economicità di rappresentare, per esempio, i numeri interi positivi nella usuale notazione decimale piuttosto che ognuno con una singola configurazione non replicata. E d'altra parte abbiamo già notato, nel caso binario, come gli usuali sistemi di numerazione includano sia una componente estensionale sia una intensionale; nella notazione decimale dell'entità di informazione «centoventisette», per esempio, ognuna delle tre cifre, 1, 2 e 7 è associata al numero corrispondente attraverso un'elencazione esplicita ( $1 \rightarrow$ uno,  $2 \rightarrow$ due, ...), mentre il sistema posizionale per cui  $127 = 1 \times 10^2 + 2 \times 10^1 + 7 \times 10^0$  è evidentemente basato su una regola appunto di tipo intensionale.

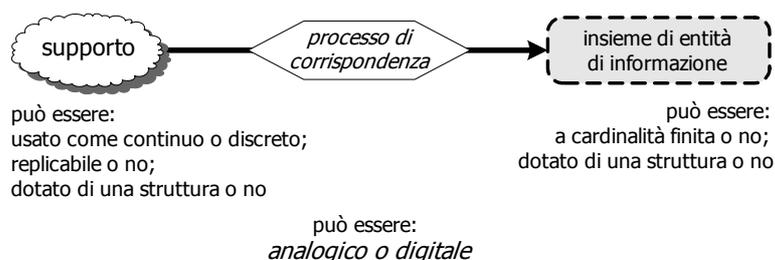
### *Qualche riflessione*

Le distinzioni tra le quattro strategie introdotte sono riassumibili estendendo lo schema precedente, come segue:

Strategia	A. Modalità di definizione del processo di corrispondenza	B. Ridefinizione del processo di corrispondenza al variare dell'insieme delle entità di informazione	C. Applicabilità in funzione della cardinalità dell'insieme delle entità di informazione
Analogico ideale	intensionale	nessuna ridefinizione è necessaria	applicabile anche per cardinalità non limitata a priori
Analogico discreto	intensionale	occorre ridefinire il processo (almeno se il nuovo insieme contiene più entità)	applicabile anche per cardinalità non limitata a priori
Digitale replicato	estensionale per le configurazioni elementari; intensionale per la replica	occorre generalmente aumentare il numero di configurazioni elementari nelle configurazioni	applicabile anche per cardinalità non limitata a priori
Digitale	estensionale	occorre estendere il processo definito in precedenza	applicabile solo per cardinalità finita e con entità note a priori

Strategia	D. Applicabilità in funzione della struttura dell'insieme delle entità di informazione	E. Condizioni sul supporto
Analogico ideale	applicabile solo se una struttura è presente	applicabile solo con supporti dotati di struttura
Analogico discreto	applicabile solo se una struttura è presente	applicabile solo con supporti dotati di struttura
Digitale replicato	applicabile solo se una struttura di replica è presente	applicabile solo con supporti replicabili
Digitale	applicabile in ogni caso	applicabile in ogni caso

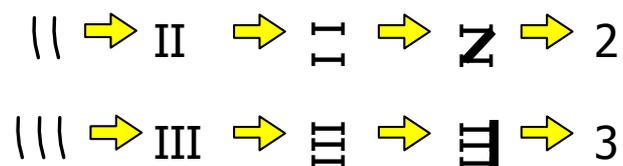
Una conferma che traiamo da questo schema riguarda il dominio semantico dei termini «analogico» e «digitale», che abbiamo usato per qualificare la strategia con cui si realizzano i processi di corrispondenza tra configurazioni del supporto fisico ed entità di informazione in presenza di meta-informazione. *Tale qualificazione attiene quindi a caratteristiche non del supporto e nemmeno dell'informazione, ma della loro relazione.* Ancora schematicamente:



Ne segue in particolare (ma è una considerazione ormai evidente da quanto scritto sopra) che, a differenza di quanto viene spesso affermato, «digitale» non è affatto sinonimo di «discreto». Sebbene ogni processo di corrispondenza digitale non possa che essere utilizzato per l'identificazione di un insieme discreto di entità di informazione e non possa che essere basato su un supporto inteso come discreto, sono certamente possibili processi di corrispondenza analogici e, nello stesso tempo, discreti.

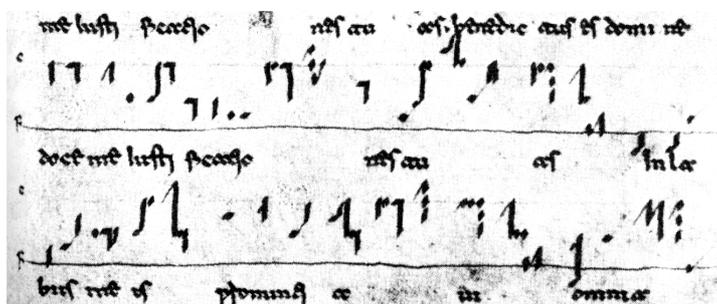
Per quanto concettualmente distinti, analogico e digitale presentano spesso relazioni assai peculiari. Consideriamo, per

esempio, la seguente, plausibile, evoluzione storica della notazione dei numeri due e tre:



Originariamente analogica (e discreta), la notazione (cioè il processo di corrispondenza inteso come «regola di lettura» del supporto), nel corso del tempo si è progressivamente «convenzionalizzata», trasformandosi quindi in digitale. Dov'è il confine tra le due strategie? Inteso in prospettiva diacronica, il problema non ha, evidentemente, una soluzione definita.

Un secondo esempio. La notazione musicale medievale:



era essenzialmente analogica: scansione temporale delle note da sinistra a destra; l'altezza di ogni nota rappresentata dalla sua posizione verticale. La notazione attuale:



è invece arricchita di componenti convenzionali (per rappresentare legati, durate, ...), che, pur mantenendone la base analogica, la rendono anche «un po' digitale».

Del resto, la compresenza in un supporto di componenti analogiche e componenti digitali non solo è possibile ma non è nemmeno così inusuale, come è esemplificato da un testo come:

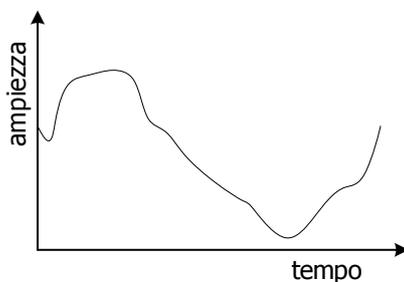
questa frase non è interessante  
 QUEST'ALTRA È INTERESSANTE  
 QUEST'ULTIMA È **MOLTO** INTERESSANTE!

in cui l'informazione portata è dovuta sia al testo, inevitabilmente codificato in forma digitale, sia alla sua formattazione (maiuscolo/minuscolo, dimensione del testo, grassetto), basata su un processo di corrispondenza che è invece analogico.

*Sul «significato tecnologico» di analogico e digitale*

Un'ulteriore riflessione riguarda la relazione tra le accezioni di analogico e digitale che abbiamo introdotto e il «significato tecnologico» di questi termini, quello per cui esistono, per esempio, dei particolari dispositivi chiamati *convertitori analogico-digitali* (*analog-to-digital converters*, ADC), caratterizzati funzionalmente per la loro capacità di trasformare i segnali analogici forniti loro in ingresso in corrispondenti (in un senso definito delle operazioni svolte dagli ADC stessi) segnali digitali. Discutiamo allora il problema che abbiamo posto proprio a partire da una breve analisi delle operazioni svolte da un ADC.

Supponiamo che in ingresso all'ADC venga fornito un segnale del tipo:



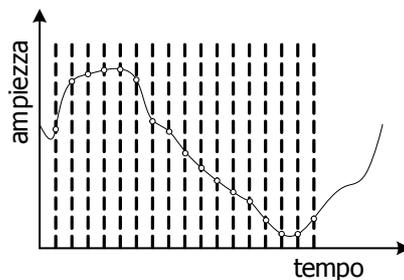
in cui il termine «ampiezza» indica, come d'abitudine, in modo generico i valori della grandezza fisica (una velocità, una tensione elettrica, una temperatura, ...) «che porta» il segnale stes-

so. Nella terminologia che abbiamo impiegato finora, un segnale può essere dunque inteso come una successione temporale di configurazioni, ognuna corrispondente a un'ampiezza e osservabile in un istante: si comprende perciò perché i segnali vengano interpretati come entità *intermedie* tra il mondo della materia/energia e il mondo dell'informazione, e siano considerati come strumenti atti a stabilire una connessione funzionale tra i due mondi.

Il fatto che l'ingresso all'ADC sia considerato analogico esprime l'ipotesi che ogni configurazione di cui il segnale è costituito sia utilizzata per identificare un'entità di informazione attraverso un processo di corrispondenza basato *sulla presenza di una struttura* nell'insieme delle ampiezze (nel caso dei segnali elettrici si impiegano per esempio tensioni, che si fanno confrontare in termini di maggiore-minore sia componendo additivamente: su un'insieme di tensioni è cioè empiricamente significativo sostenere affermazioni del tipo «questa tensione è maggiore di quest'altra» e «questa tensione è doppia di quest'altra»).

Si ipotizza poi generalmente (e generalmente in modo solo implicito) che l'accesso al segnale sia sperimentalmente ottenibile con una risoluzione arbitrariamente elevata sia nel tempo sia nelle ampiezze; in conseguenza di ciò, nella pratica ci si comporta *come se* il segnale fosse costituito da un *insieme infinito di configurazioni* (una per ogni istante temporale di osservazione), ognuna scelta da un *insieme infinito di possibili configurazioni* (una per ogni ampiezza). Compito dell'ADC è perciò di trasferire l'informazione e la meta-informazione presenti nell'insieme infinito  $\times$  infinito che è il segnale analogico di partenza in un segnale digitale finito  $\times$  finito (tempi  $\times$  ampiezze) di configurazioni. Ciò si realizza in tre passi successivi, che possiamo chiamare di *campionamento*, *quantizzazione* e *codifica*.

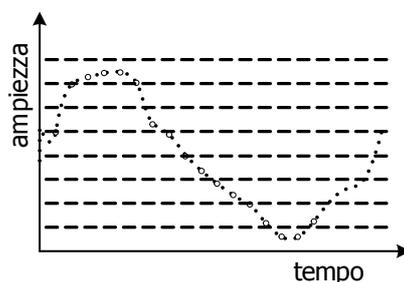
La prima operazione, il *campionamento*, ha lo scopo di selezionare un sottoinsieme finito di configurazioni, ognuna corrispondente a un «campione temporale» del segnale originario prelevato in un istante dato:



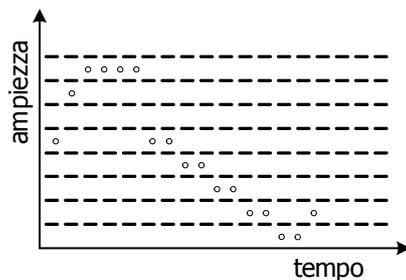
Si giunge così a disporre di un insieme finito di campioni, l'ampiezza di ognuno dei quali è però ancora corrispondente a una configurazione scelta da un insieme infinito: l'ADC deve allora operare una seconda trasformazione, chiamata *quantizzazione*, finalizzata a ricondurre l'ampiezza di ogni campione a un valore scelto da un insieme finito, i cui elementi (cioè le configurazioni possibili per il segnale generato dall'ADC) sono detti «livelli, o canali, di quantizzazione».

(Una nota terminologica: è davvero curioso come spesso «quantizzare» e «quantificare» siano trattati come sinonimi, e il primo sia usato al posto del secondo. Si tratta di un errore: quantizzare significa ridurre a valori discreti e non ulteriormente divisibili, e non esprimere in forma quantitativa).

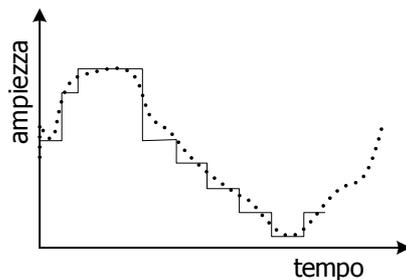
Per effettuare una quantizzazione dapprima si scelgono i canali a cui ricondurre l'ampiezza di ogni campione:



quindi ogni campione viene riconosciuto appartenente a un canale, così che ogni possibile ampiezza è ricondotta al valore di riferimento per il canale a cui appartiene:



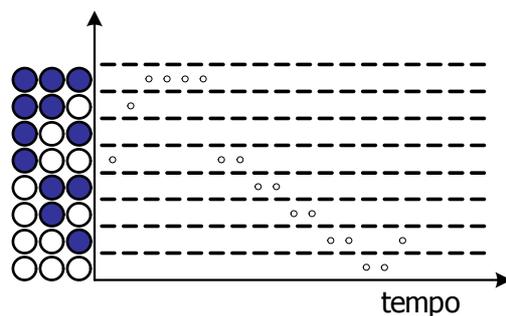
Il segnale generato a seguito di un campionamento e di una quantizzazione è dunque:



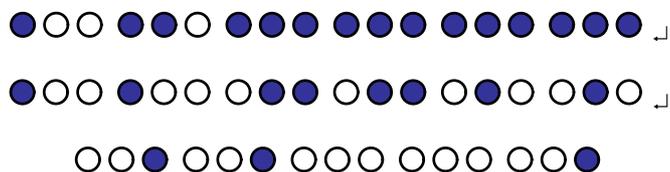
Si tratta di un insieme finito di configurazioni discrete, ognuna delle quali identifica un'entità di informazione sulla base di un processo di corrispondenza che di principio potrebbe essere sia analogico (discreto, ovviamente) sia digitale (replicato o meno). In altri termini, il campionamento e la quantizzazione sono operazioni caratteristiche propriamente di un «discretizzatore» e non ancora di un «digitalizzatore».

L'ultima fase dell'intervento dell'ADC, quella dunque più specificamente di digitalizzazione, consiste nella *codifica dei canali* e quindi nella generazione di opportune configurazioni, una per ogni campione, su un supporto interpretato come digitale, e spesso un supporto bistabile (cioè un bit<sub>m</sub>) replicato. Nell'esempio della quantizzazione a 8 canali riportata nel grafico precedente, occorrono 3 configurazioni elementari (dato che  $8=2^3$ ) per ogni campione. Se raffiguriamo ancora come ○ e ● le due configurazioni elementari da replicare (potrebbe essere una lampadina spenta o accesa, un circuito elettrico in cui passa o non passa corrente, o qualsiasi altro sistema fisico con caratte-

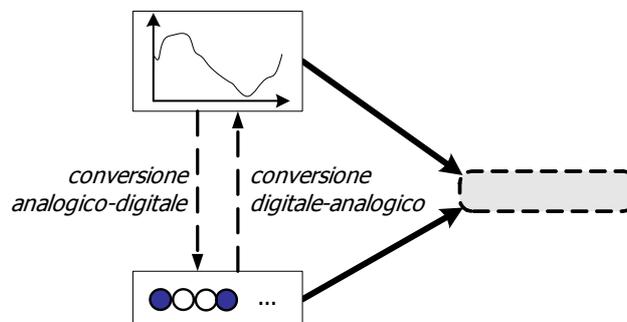
ristiche appunto di bistabilità) e scegliamo l'usuale codifica binaria per cui i canali vengono codificati in questo modo:



(si saranno riconosciuti i numeri da 0 a 7, espressi nell'usuale codifica binaria) l'uscita dell'ADC, in risposta al segnale fornito in ingresso, diventa finalmente:



Il segnale analogico di partenza è stato così trasformato in una successione di  $\text{bit}_m$ . In una condizione ideale, i due supporti, opportunamente interpretati, dovrebbero identificare la *stessa* informazione (operativamente, dovrebbe essere possibile effettuare sulla successione di  $\text{bit}_m$  una conversione digitale-analogico in modo da riottenere lo stesso segnale di partenza):



Si comprende dunque la criticità di un'appropriata scelta dei parametri che caratterizzano le operazioni di campionamento e quantizzazione, il numero di campioni prelevati e il numero di livelli di quantizzazione, per garantire la fedeltà del risultato della digitalizzazione di un segnale.

*L'Appendice 2 di questa Parte contiene alcune note circa il problema della caratterizzazione della qualità delle operazioni di campionamento e quantizzazione, e quindi delle relazioni tra segnali analogici e segnali digitali.*

## CAPITOLO DECIMO

### PERCHÉ IL DIGITALE OGGI, DUNQUE?

La ragione per cui di fatto si sceglie di adottare spesso una strategia digitale replicata, codificando ogni configurazione nella forma di una successione di configurazioni elementari bistabili, ci conduce finalmente a proporre una risposta al problema che abbiamo mantenuto sullo sfondo di questa analisi: perché oggi, nonostante tutte le motivazioni a favore dell'analogico, si preferisce così frequentemente il digitale, e in particolare il digitale binario replicato?

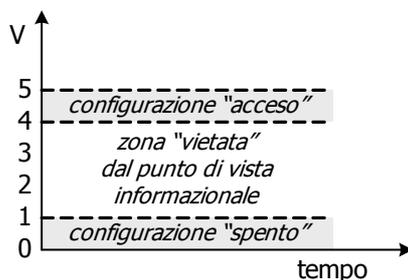
La risposta non può essere estrinseca («i sistemi digitali sono oggi molto diffusi») o banale («è più facile progettare sistemi digitali che sistemi analogici»): occorre ricordare infatti che praticamente tutti i sistemi elettronici per la gestione dell'informazione precedenti ai calcolatori erano analogici, e in particolare lo erano, e in larga misura rimangono tali, telefono, radio e televisione. Le ragioni più specifiche del digitale rimangono in effetti sottintese nello schema di confronto che abbiamo introdotto.

Il fatto, e si tratta di un'ovvietà, è che ogni sistema fisico non può che sottostare alle leggi del mondo fisico, essendo parte di esso ed essendo individuato rispetto a un ambiente che è a sua volta fisico. Una di queste leggi, gravida di conseguenze pur nell'informalità con cui la esprimiamo, asserisce che *nessun* sistema può essere perfettamente isolato rispetto all'ambiente circostante (è ragionevole tralasciare in questa considerazione quella particolare entità che è l'universo, un non-sistema proprio perché mancante di un esterno rispetto a cui essere individuato). Ciò implica che, per quanto si realizzi accuratamente la «chiusura» del sistema, l'ambiente potrà comunque produrre degli effetti su di esso, perturbandone lo stato e producendo

eventualmente quegli effetti indesiderati che vengono spesso chiamati «rumore».

Nel momento in cui si sceglie un sistema fisico in quanto supporto per informazione, ci si pone perciò, tra gli altri, l'obiettivo della sua immunità al rumore. Quand'anche il suo stato venisse alterato a causa della presenza di rumore, il sistema dovrebbe essere in grado di mantenere stabilmente la sua configurazione, in modo da non cambiare l'entità di informazione che identifica. È chiaro che un supporto usato con un processo di corrispondenza analogico ideale non soddisfa questa condizione, proprio perché ogni suo stato potrebbe rappresentare di principio una configurazione lecita dal punto di vista informativo e quindi risulta in generale impossibile distinguere l'eventuale presenza di rumore sovrapposto a uno stato. L'analogico discreto è, in questo senso, migliore, e lo è tanto più «quanto più è discreto» (al di là del gioco di parole: quanto più sono mantenute differenti le configurazioni adottate). D'altra parte, quanto più è discreto il supporto, tanto meno esso è usato efficientemente dal punto di vista analogico.

L'estremo di questo procedimento di discretizzazione (propriamente: di quantizzazione) si ottiene nel caso dei sistemi bistabili, i cui due stati stabili operano come attrattori dei bacini che definiscono le configurazioni del supporto. Per esempio un dispositivo elettrico potrebbe essere adattato a un comportamento bistabile come segue:



per cui nel *continuum* dei valori della tensione che può essere presente ai capi del dispositivo (con il simbolo  $V$  posto nel grafico sull'asse verticale, quello delle ampiezze, si indicano appunto le tensioni elettriche), supposti nell'intervallo tra 0 e 5 volt, e

dati i due valori nominali di 0 volt («dispositivo spento») e 5 volt («dispositivo acceso»), si potrebbero usare tutti i valori tra 0 e 1 volt per la configurazione «spento» e tutti i valori tra 4 e 5 volt per la configurazione «acceso» (nelle realizzazioni tecnologiche non sono generalmente questi gli intervalli scelti, ma i dettagli implementativi non ci importano qui). Si ottengono così due risultati positivi:

- si introduce una *tolleranza a piccoli effetti di rumore* (anche in presenza di una tensione spuria di 0,5 volt che si somma a quella iniziale di 0 volt la configurazione «spento» rimane stabile);
- si introduce la *possibilità di riconoscimento automatico della presenza di rumore* (una tensione di 3 volt corrisponde a uno stato informazionalmente vietato, in quanto non appartenente ad alcuna configurazione, e quindi può essere scartata come risultato del fatto che al segnale si è sovrapposto una rilevante quantità di rumore).

Naturalmente tutto ciò ha un costo: mentre l'analogico ideale è in grado di portare quantità di informazione limitate solo dalla capacità di osservazione sul supporto, e in particolare dalla capacità di risoluzione nel tempo e nell'ampiezza dei segnali, il digitale binario replicato è assai inefficiente proprio dal punto di vista della quantità di informazione che è in grado di portare (si pensi alla diversa storia dello sviluppo dei sistemi televisivi analogico, cioè tradizionale, e digitale), ed è dunque utilizzabile solo in presenza di sistemi in grado di compensare questa inefficienza con notevoli capacità di replica e di gestione di supporti replicati.

È proprio questo il ruolo che storicamente i calcolatori digitali hanno avuto.

Suggeriamo che la distinzione che abbiamo proposto tra processi di corrispondenza analogici e digitali, che dunque attiene non all'essere il supporto (usato come) continuo o discreto ma alla strategia con cui la meta-informazione viene supportata, sia sintetizzabile *in riferimento all'elemento che caratterizza* tali processi:

- la materia/energia di cui il supporto fisico è costituito nel caso analogico,
- l'informazione implicata nel processo stesso nel caso digitale.

L'analogico è caratterizzato, ma anche dipendente, dalle *leggi della fisica*, mentre il digitale, che pure deve ancora tener conto delle limitazioni fisiche dei supporti, è per sua natura basato sulle *leggi dell'informazione*. E da ciò deriva la sua universalità.

## Appendice I

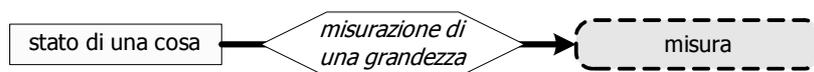
### Considerazioni sul problema generale della misurazione

Abbiamo posto il problema che ci ha consentito di analizzare la distinzione tra digitale e analogico in questi termini: come fare in modo che le configurazioni del supporto siano in grado di (sup)portare non solo informazione ma anche meta-informazione, cioè informazione di struttura? Siamo cioè partiti dall'ipotesi che l'informazione e la meta-informazione siano date, e che l'oggetto della decisione sia il supporto. Una situazione analoga ma a parti invertite si presenta a proposito della misurazione, un'attività finalizzata a estrarre informazione e meta-informazione da un sistema dato. Nel caso della misurazione il problema non è quindi più di come *scrivere* (cioè codificare) il supporto in modo che esso sia in grado di portare l'informazione di cui si dispone, ma, al contrario, di come *leggere* il supporto in modo da ottenere l'informazione che esso porta.

(A proposito di questa relazione, si noti una ragione di non completa simmetria tra queste attività: mentre «scrittura sul supporto» e «codifica» possono essere considerati sinonimi, non così è per «lettura dal supporto» e «decodifica», dato che la decodifica suppone un previo atto intenzionale di scrittura, situazione quantomeno non tipica nel caso della misurazione).

Per via di questa analogia è dunque interessante delineare quello che potrebbe essere chiamato il *problema generale della misurazione*, la cui modellistica e formalizzazione sono il risultato di studi relativamente recenti.

La misurazione è un'operazione empirica che porta ad associare entità di informazione, le misure, a stati di cose relativamente ad attributi, le grandezze:



Come abbiamo già rilevato nella Parte precedente, la valutazione di una grandezza induce sull'insieme delle cose valutate, o-

gnuna in un suo stato, una relazione di sostituibilità, tale che due stati associati a una stessa entità di informazione (cioè a una stessa misura, in questo caso) vengono riconosciuti in uno stesso insieme di sostituibilità, e quindi in una stessa configurazione. Dato l'insieme degli stati considerato:

$$S = \{s_1, s_2, \dots\}$$

e l'insieme delle misure possibili:

$$E = \{e_1, e_2, \dots\}$$

rappresentiamo la grandezza come una funzione  $m$  che associa a ogni stato  $s_i$  di  $S$  una misura  $e_j = m(s_i)$  di  $E$ . Una configurazione  $c_j$  è allora un insieme di stati  $s_{i_1}, s_{i_2}, \dots$  tale che  $m(s_{i_1}) = m(s_{i_2}) = \dots = e_j$ . Se rappresentiamo con  $\stackrel{\circ}{\sim}$  questa relazione di sostituibilità (il pallino segnala dunque che la relazione è definita tra elementi del mondo della materia/energia e non tra entità di informazione), possiamo scrivere che:

$$\text{se } s_{i_1} \stackrel{\circ}{\sim} s_{i_2} \text{ allora } m(s_{i_1}) = m(s_{i_2})$$

una relazione che può essere letta così: se due stati sono nella relazione di sostituibilità propria della grandezza misurata, cioè identificano la stessa configurazione, allora devono avere la stessa misura per quella grandezza. Si tratta di una riespressione di quello che in precedenza abbiamo chiamato *la compatibilità delle relazioni di sostituibilità e identificazione*.

Questa condizione si ripropone in presenza di una struttura sull'insieme  $S$ . Supponiamo, per esempio, che, sempre relativamente alla grandezza in considerazione, tra gli stati sia definita una relazione di ordine empirico, che rappresentiamo con  $\stackrel{\circ}{<}$ , per cui possiamo dire che uno stato «è più» (lungo, pesante, ...) di un altro. In questo caso, la funzione  $m$  deve «conservare su»  $E$  la struttura definita su  $S$  dalla relazione  $\stackrel{\circ}{<}$ , cioè deve conservare la meta-informazione presente in  $S$ , condizione che corrisponde a:

$$\text{se } s_{i_1} \stackrel{\circ}{<} s_{i_2} \text{ allora } m(s_{i_1}) < m(s_{i_2})$$

per cui se uno stato si presenta empiricamente minore di un altro relativamente a una grandezza, allora la misura assegnata al primo deve essere minore della misura assegnata al secondo.

In generale, per ogni procedimento di misurazione di una grandezza l'insieme degli stati misurabili si presenta in effetti come un *sistema relazionale*  $[S, \overset{\circ}{=}, R_S]$ , cioè come un insieme di stati  $S$  dotato di una relazione di sostituibilità  $\overset{\circ}{=}$  e di un insieme  $R_S$  di ulteriori relazioni empiriche, eventualmente vuoto se su  $S$  non è presente meta-informazione. La misurazione di stati di  $S$  viene allora formalizzata mediante una funzione-che-conserva-le-relazioni (ciò che in algebra si chiama un *morfismo*), dal sistema relazionale citato al sistema relazionale delle misure:  $[E, =, R_E]$ . La condizione fondamentale che il morfismo  $m$  deve soddisfare è che per ogni relazione  $r$  di  $R_S$  deve esistere una corrispondente relazione  $m(r)$  di  $R_E$ , e che:

$$\text{se } r(s_{i_1}, s_{i_2}, \dots) \text{ allora } m(r) (m(s_{i_1}), m(s_{i_2}), \dots)$$

(nell'esempio precedente, dunque,  $m$  associa  $[S, \overset{\circ}{=}, \overset{\circ}{<}]$  a  $[E, =, <]$ , e quindi, in particolare,  $m(\overset{\circ}{<}) = <$ , una notazione certamente inusuale, dato il fatto che la funzione  $m$  risulta applicata in questo caso a una relazione).

Interessante dal nostro punto di vista è che le relazioni in  $R_S$  individuano il *tipo di scala* in cui la grandezza viene misurata: se  $R_S$  è l'insieme vuoto, e quindi nessuna relazione oltre alla sostituibilità è definita su  $S$ , si dice che la misurazione viene compiuta in una scala *nominale*, corrispondente a una classificazione (definita per sostituibilità appunto) degli stati. Le relazioni eventualmente presenti in  $R_S$  arricchiscono la scala, che nell'esempio precedente diventa *ordinale*, e introducono della meta-informazione, che il morfismo  $m$  deve conservare.

La fondamentale utilità della *teoria dei tipi di scala* è che essa specifica in modo non ambiguo quali relazioni sono conservate dal morfismo proprio della scala, e quindi sono significativamente utilizzabili in processi inferenziali che portino ad applicare al mondo della materia/energia risultati ottenuti nel mondo dell'informazione. Un semplice (e noto, ma non per questo evitato) esempio degli errori che l'applicazione di questa teoria consente di evitare è il seguente. L'asserzione che oggi è caldo il doppio di ieri perché oggi ci sono 30 °C e ieri 15 °C *appare* non solo perfettamente comprensibile, ma anche corretta. Il fatto è però che se esprimiamo questi due valori di temperatura non in gradi Celsius ma in gradi Fahrenheit, una conversione perfet-

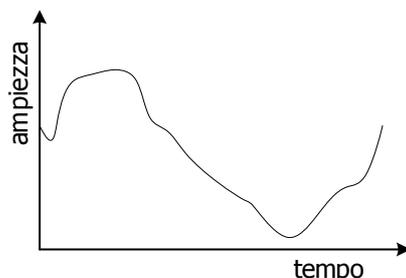
tamente lecita e compiuta abitualmente, otteniamo rispettivamente 86 °F e 59 °F, valori che ovviamente non sono il doppio l'uno dell'altro. La ragione di ciò è che la relazione «doppio di» si applica in questo caso alle entità di informazione, cioè alle misure, ma non alle cose, e questo proprio perché il morfismo con cui viene misurata la grandezza in esame conserva l'ordine e la differenza ma non il rapporto.

La teoria dei tipi di scala è applicabile non solo alle misurazioni, ma a qualsiasi processo di corrispondenza: per estensione della caratterizzazione proposta in questa Parte, possiamo allora concluderne che processi di corrispondenza in scala nominale non possono essere che digitali, mentre nel caso di scale algebricamente più ricche l'alternativa tra analogico e digitale può essere effettivamente posta.

## Appendice 2

### *Il problema della qualità della conversione analogico-digitale*

Abbiamo discusso nelle pagine precedenti come un sistema fisico interpretato come supporto per informazione mediante un processo di corrispondenza analogico ideale, per esempio:



possa essere convertito in un supporto interpretato come digitale replicato mediante la discretizzazione nel tempo (campionamento) e nelle ampiezze (quantizzazione) del segnale e nella sua successiva codifica in  $\text{bit}_m$ :



Questa conversione pone il problema applicativo dell'*equivalenza* dei due supporti e il problema concettuale della *convertibilità* dell'analogico (ideale) in digitale (replicato).

Critica a questo proposito è la realizzazione delle operazioni di campionamento e di quantizzazione, le cui caratteristiche possono essere significativamente presentate in parallelo:

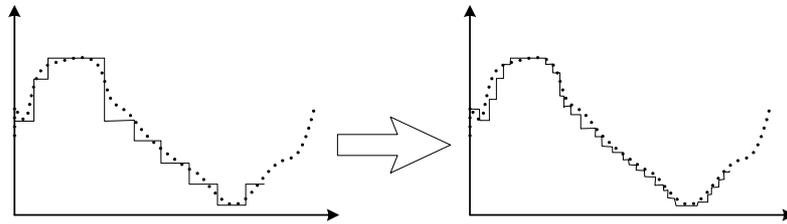
Campionamento	Quantizzazione
per campionare un segnale	per quantizzare ogni campione
occorre stabilire l'ampiezza	
dell'intervallo di tempo di attesa	dell'intervallo di ampiezze corrispon-
tra osservazioni successive, $t_c$	dente a ogni canale, $a_q$
una grandezza	misurata in unità
di tempo (nell'asse orizzontale sul	della grandezza relativa al segnale
grafico), per esempio secondi,	(nell'asse verticale sul grafico), per
	esempio volt,

<p>o, equivalentemente, occorre stabilire il numero di campioni che verranno acquisiti per unità di tempo, <math>n_c = 1/t_c</math></p>	<p>di canali per unità di ampiezza, <math>n_q = 1/a_q</math></p>
così che fissata	
<p>la durata del segnale, <math>d</math></p>	<p>la variazione massima dell'ampiezza del segnale, <math>m</math></p>
il numero totale di	
<p>campioni da acquisire è <math>n_c \times d</math></p>	<p>canali di quantizzazione è <math>n_q \times m</math></p>

Il parametro generalmente adottato per caratterizzare il campionamento è il numero di campioni per unità di tempo,  $n_c$ , chiamato *frequenza di campionamento*,  $f_c$ . Nel caso in cui si adotti come unità di tempo il secondo, la corrispondente unità di misura della frequenza, numero di campioni al secondo, prende il nome di «hertz», con simbolo Hz. Per esempio, campionare con una frequenza  $f_c = 5$  Hz significa acquisire 5 campioni al secondo, cioè un campione ogni 0,2 secondi.

Nell'ipotesi che i canali vengano codificati mediante bit<sub>m</sub>, il parametro generalmente adottato per caratterizzare la quantizzazione è la lunghezza della successione di bit<sub>m</sub> che codifica ogni canale,  $b_q$ , corrispondente al logaritmo in base 2 del numero totale di canali,  $\log_2(n_q \times m)$ , un valore chiamato *numero di bit di quantizzazione*. Per esempio, se i canali sono 8 allora  $b_q = \log_2(8) = 3$ , poiché con successioni di 3 bit<sub>m</sub> si possono appunto codificare fino a 8 configurazioni diverse.

L'intuizione suggerisce che all'aumentare della frequenza di campionamento  $f_c$  e del numero di bit di quantizzazione  $b_q$  migliorerà la corrispondenza tra il segnale analogico di partenza e il segnale digitale convertito:



Occorre però ricordare che il concetto di idealità che stiamo impiegando a proposito dei segnali analogici da trasformare non è assoluto, ma dipendente dal livello di risoluzione dei sistemi adottati per l'accesso al supporto. Operativamente, nessun segnale reale può essere osservato in «variazioni istantanee» (o anche: in variazioni infinitesime) nel tempo o in ampiezza, e

quindi nessun segnale reale richiede comunque un numero infinito di campioni e un numero infinito di livelli di quantizzazione per essere perfettamente ricostruito alla soglia di risoluzione effettivamente disponibile: il numero di istanti di tempo di osservazione e il numero di livelli di ampiezza *operativamente necessari* per ricostruire il segnale è in ogni caso finito.

In conseguenza, una volta stabilite le caratteristiche del segnale da digitalizzare e del sistema impiegato per accedere a esso (e quindi in particolare la sua risoluzione nel tempo e in ampiezza), risultano fissati un numero di campioni, e quindi una frequenza di campionamento limite  $\varphi_c$ , e un numero di canali di quantizzazione, e quindi un numero di bit di quantizzazione limite  $\beta_q$ , tali che il segnale digitale ottenuto campionando ad almeno  $\varphi_c$  Hz e quantizzando con almeno  $\beta_q$  bit sarà in grado di identificare la *stessa* informazione del segnale analogico di partenza. Detto altrimenti, se si effettua la digitalizzazione adottando questi parametri *operativamente non si perde informazione* nell'operazione.

Un semplice esempio può aiutare a chiarire questo punto. Supponiamo di voler digitalizzare un'ora di musica, inizialmente disponibile su un supporto di tipo analogico ideale (potrebbe essere un supporto tecnologico come un'audiocassetta o su vecchio disco in vinile, ma anche il segnale elettrico ottenuto da un microfono con cui stiamo registrando «dal vivo»). Adottiamo per la discretizzazione i parametri tipici dei CD audio (che sono stati scelti per essere, fattualmente, cioè in riferimento alle caratteristiche della fisica e della fisiologia dei sistemi coinvolti, oltre i due valori limite citati):

- acquisizione su due piste, cioè «in stereo»;
- campionamento con frequenza pari a 50 kHz, cioè con acquisizione di 50000 campioni al secondo per pista;
- quantizzazione a 16 bit, cioè con una codifica che richiede  $16/8 = 2$  byte per campione.

A questo punto si ottiene facilmente il numero complessivo di  $\text{bit}_m$  necessari per memorizzare l'intero segnale:

$$\begin{aligned} &60 \text{ minuti di musica} \times \\ &60 \text{ secondi al minuto} \times \end{aligned}$$

2 piste ×  
50000 campioni al secondo per pista ×  
2 byte per campione

è pari a 720 milioni di byte, cioè circa 700 Mbyte

un valore davvero elevato (si tratta di oltre 5 miliardi di bit<sub>m</sub>...), che ben documenta le precedenti considerazioni circa la necessità, per l'adozione di supporti impiegati con processi di corrispondenza di tipo digitale replicato, di disporre di sistemi molto efficienti nella gestione di supporti replicati.

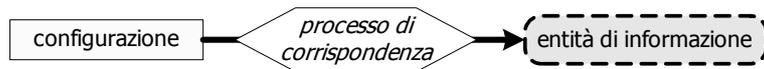
PARTE TERZA  
(MEDIALITÀ E) MULTIMEDIALITÀ



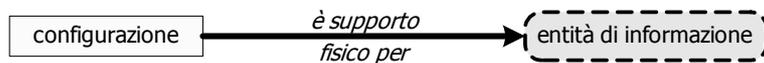
## CAPITOLO UNDICESIMO

### MEDIA

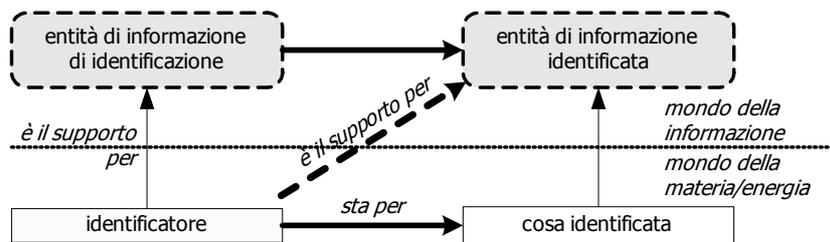
La discussione che abbiamo condotto nelle pagine precedenti ha contribuito a mettere in evidenza la centralità informazionale di quelli che abbiamo chiamato *processi di corrispondenza*, il cui ruolo abbiamo schematizzato così:



sulla base dell'ipotesi che:



Tutto ciò, che pure si è dimostrato appropriato nell'analisi dell'opposizione analogico-digitale, ha mantenuto in secondo piano un altro tema, fondamentale proprio da un punto di vista informazionale: la *relazione tra stati dei sistemi* usati come supporti e configurazioni. Proprio a questo riguardo, una considerazione più attenta porta immediatamente a riconoscere che i due diagrammi precedenti rappresentano una versione solo semplificata dello schema:

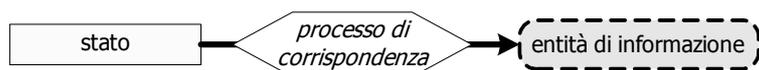


che abbiamo introdotto analizzando il significato delle relazioni di identificazione e sostituibilità.

Critica è stata la scelta, compiuta appunto per semplificare la presentazione, di non mantenere distinti identificatori ed entità di informazione di identificazione, cioè appunto stati e configurazioni. Propriamente, infatti, supporto per entità di informazione identificate sono non *configurazioni* (cioè, ricordiamo, insiemi di sostituibilità di stati), ma *stati di sistemi*:



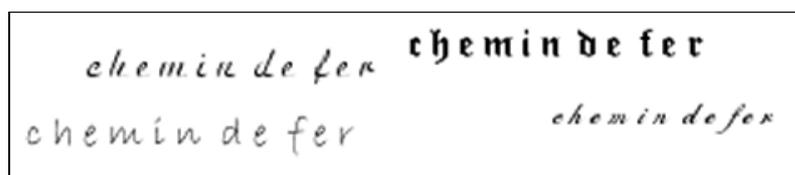
e quindi:



Il passaggio da stati a configurazioni è tutt'altro che scontato, ed è anzi cruciale dal nostro punto di vista proprio perché, come gli schemi precedenti cercano di evidenziare, stabilisce l'associazione tra mondo della materia/energia e mondo dell'informazione. Come vedremo, un'analisi su questo «punto di contatto» tra materia/energia e informazione ci porterà a riflettere sulla natura e il ruolo delle entità che fungono da *intermediarie*, proprio perché stanno «in mezzo»: i *media* (termine che, a dispetto delle distorsioni a cui è continuamente sottoposto, rimane pur sempre il plurale del latino *medium*).

*(Multi)medialità?*

Consideriamo il seguente (stato di un) sistema fisico:



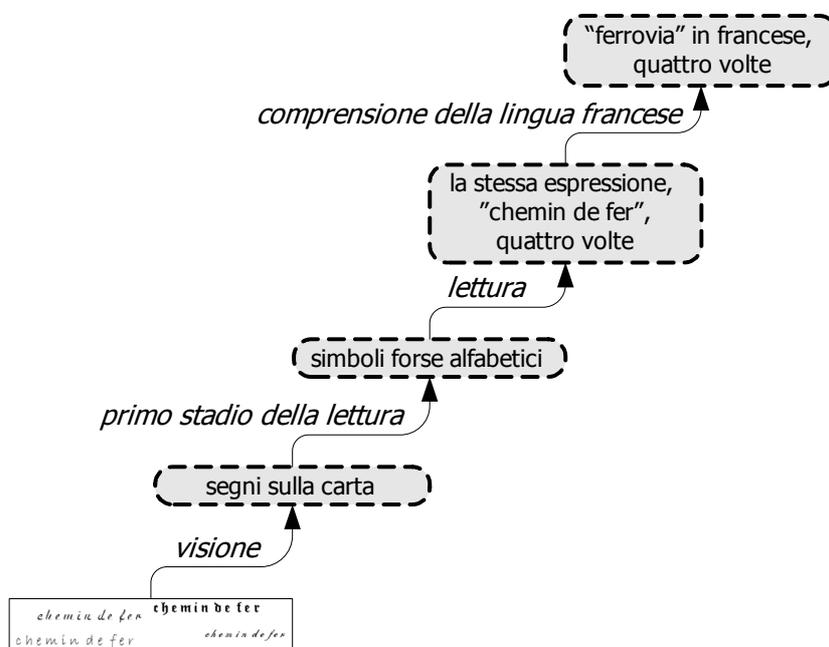
Cosa rappresenta questa figura (secondo la terminologia che stiamo impiegando: cosa identifica questo insieme di macchie di inchiostro su un foglio)? La risposta non è «oggettiva», ma

dipende dalle conoscenze del soggetto a cui la domanda è posta. Ipotizziamo alcune possibili posizioni:

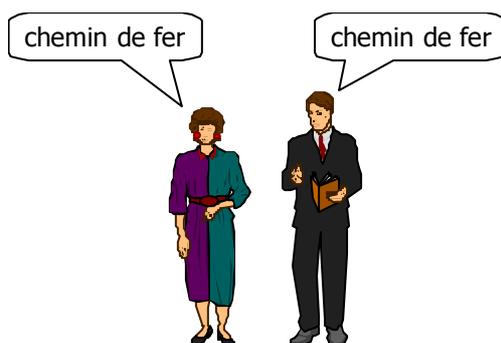
1. «per quattro volte è scritto 'ferrovia' in lingua francese»;
2. «per quattro volte è scritta una stessa espressione (in una lingua che ignoro)»;
3. «si tratta di un insieme di simboli (forse alfabetici)»;
4. «si tratta di segni sulla carta»;

e la regressione potrebbe continuare (così come, evidentemente, sono del tutto possibili interpolazioni; per esempio, tra le risposte 1 e 2 si potrebbe immaginare un'ulteriore posizione del tipo «per quattro volte è scritta una stessa espressione che riconosco in lingua francese ma di cui ignoro il significato»).

Ognuna di queste posizioni è esemplificativa di un diverso insieme di competenze a disposizione del soggetto interrogato, secondo un percorso del tipo:

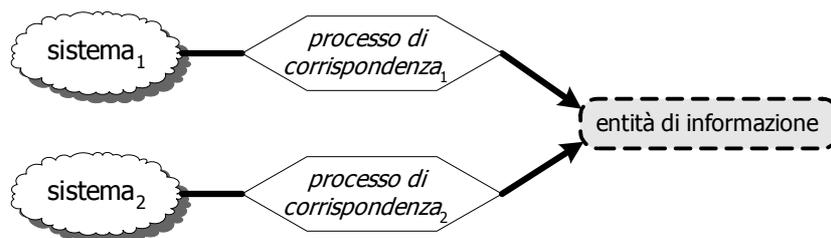


Ognuna di queste competenze richiede quelle «sottostanti» per essere applicata al sistema fisico dato, ma non le implica logicamente. Per esempio, dato un *diverso* sistema fisico:



un soggetto potrebbe ancora correttamente applicare la sua competenza di comprensione della lingua francese pur senza disporre, per esempio perché cieco, delle competenze a essa sottostanti nel percorso precedente (naturalmente altre competenze, relative al riconoscimento dell'informazione portata dalla voce umana, sarebbero richieste in questo caso).

Ciò ribadisce quanto già abbiamo più volte considerato, e cioè che sistemi fisici diversi possono essere impiegati come supporti per una stessa entità di informazione, purché vengano adottati opportuni processi di corrispondenza:



Questo schema evidenzia come, propriamente, «medium» sia dunque, in un sistema informazionale, il processo di corrispondenza, che crea la relazione tra supporto e informazione. D'altra parte, è noto che spesso questa accezione venga estesa, fino a includere il supporto che, attraverso la *media*-zione del processo di corrispondenza, viene impiegato per identificare informazione (un riferimento a questo proposito a dizionari vari non si dimostra di grande utilità, se non per ribadire e anzi accentuare questa ambiguità. Per esempio il *Concise Oxford Dictionary* fornendo come significato di «medium» *the means by*

*which something is communicated*, propone come esemplificazioni *the medium of sound; the medium of television*. È dunque ancora per estensione che si arriva a parlare di «informazione multimediale», una forma ellittica per «informazione portata in modo multimediale», o qualcosa di simile).

In questi termini, l'essere multi-mediale appare come una caratteristica del tutto usuale per un sistema informazionale. È, per esempio, certamente multimediale il sistema informazionale che in modo generalmente inconsapevole impieghiamo nelle comunicazioni interpersonali *vis-à-vis*, dato che mette in gioco processi di corrispondenza molteplici, basati sulla vista e l'udito e spesso l'olfatto e il tatto. D'altra parte, la *multisensorialità* appare come solo una delle possibili ragioni della multimedialità. Di principio, infatti, potrebbe essere considerato multimediale per esempio anche il sistema informazionale che ci porta a concludere che il supporto:

7 + tre

identifica ultimativamente l'entità di informazione «il numero dieci». Per la lettura di questo supporto si impiegano infatti due processi di corrispondenza, largamente coincidenti ma che almeno in una fase differiscono, come è chiaro nel caso:

7 + three

nell'ipotesi di un soggetto che ignori la lingua inglese (questo esempio ribadisce, tra l'altro, la plausibilità dell'asserzione secondo cui la notazione matematica è (un processo di corrispondenza) universale).

In tutto ciò, dunque, la multimedialità appare come la regola piuttosto che come un'eccezione. Per comprendere le ragioni della sua (eventuale) novità, occorre investigare più approfonditamente il concetto di *medium*, e dunque, ancora una volta, le caratteristiche dei processi di corrispondenza.



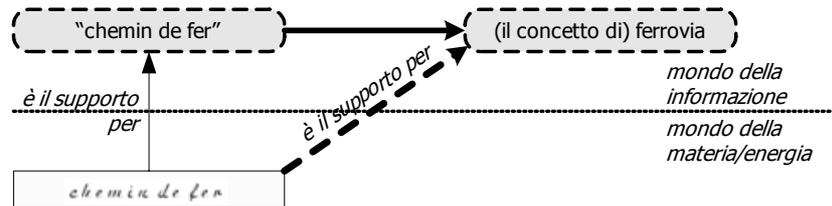
## CAPITOLO DODICESIMO

### I PROCESSI DI CORRISPONDENZA COME MEDIA

Nell'ipotesi, quanto mai realistica, che il sistema fisico:

*chemin de fer*

sia stato prodotto in modo non casuale ma intenzionale (a titolo di esempio, una tecnica di produzione casuale potrebbe consistere nel gettare una manciata di polvere di inchiostro su un foglio bianco, sperando di produrre un sistema fisico come quello raffigurato), possiamo ritenere plausibile che l'entità di informazione a cui esso rinvia sia il *concetto di ferrovia*. Sostituendo perciò nello schema generale, e tralasciando l'indicazione della cosa identificata, qui non rilevante (avrebbe potuto essere una specifica ferrovia), otteniamo:



Mediatore tra supporto e informazione identificata è un processo di corrispondenza analogo a quello esemplificato in precedenza, realizzato quindi in una successione di fasi. Esso è allusivamente visualizzabile in questo modo:

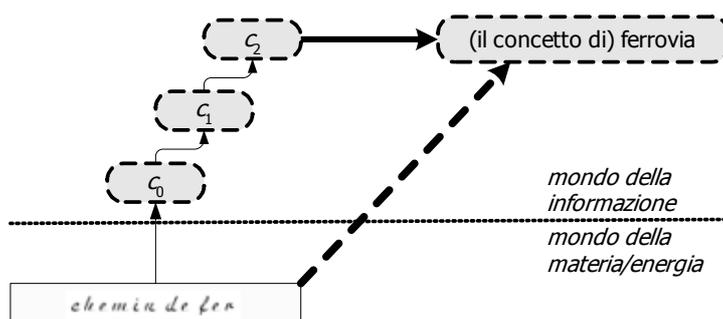
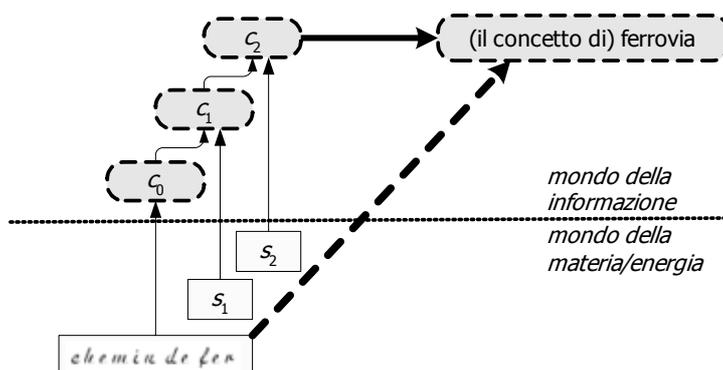


diagramma che per semplicità riporta solo tre configurazioni intermedie, benché sia chiaro che tale numero possa essere differente e dipenda comunque dal livello di dettaglio con cui si intende analizzare il processo di corrispondenza.

Questo diagramma mantiene poi implicita la comunque necessaria presenza di un supporto fisico per ognuna delle fasi in cui l'informazione viene trasformata: per completezza avremmo dunque potuto rappresentare il sistema informazionale in questo modo:



Mentre il passaggio dal sistema iniziale, *chemin de fer* nel nostro esempio, alla configurazione  $c_0$  implica uno *spostamento dell'interesse* dal mondo della materia/energia al mondo dell'informazione, le successive trasformazioni sono interpretabili come progressive trasformazioni interne al mondo dell'informazione. E il fatto che ognuna di queste configurazioni richieda un supporto fisico non modifica, naturalmente, il fatto di questo spostamento di interesse. Tanto più che se il processo di corrispondenza è realizzato «a mente», come si dice

abituamente, da un essere umano, i supporti intermedi  $s_1, s_2, \dots$  si possono pensare come corrispondenti a stati del suo cervello, e quindi risultano inaccessibili all'osservazione (si potrebbe notare qui che la complessità che abbiamo riconosciuto circa le relazioni tra stati di supporti ed entità di informazione ci consente di sostenere l'affermazione precedente senza cadere in quelle forme di riduzionismo che asseriscono la biunivocità tra stati del cervello e configurazioni della mente).

Una configurazione è dunque a tutti gli effetti *già un'entità informazionale*, cui si giunge attraverso un processo di riconoscimento di sostituibilità di stati.

### *Un inserto epistemologico*

Senza la pretesa di trattare l'argomento con particolare originalità né, tanto meno, in modo completo, tutto ciò ci consente di proporre qualche considerazione circa un tema di un certo interesse epistemologico, che sintetizziamo con una domanda: è possibile effettuare osservazioni che forniscano «dati puri», oppure ogni dato è «carico di teoria» (e specificamente: della teoria di cui, in modo esplicito o meno, l'osservatore era dotato nella preparazione e realizzazione dell'osservazione)?

Ripartiamo dalla distinzione che abbiamo posto tra stati di supporti, parti del mondo della materia/energia, e configurazioni, parti del mondo dell'informazione. Sommariamente, possiamo concluderne che gli stati siano «dati all'osservazione» mentre le configurazioni dipendano dal processo di corrispondenza messo in atto dall'osservatore. In effetti, per poter asserire che un supporto, in una sua specifica versione temporale (quanto abbiamo chiamato appunto uno stato), è osservabile, anche se non ancora effettivamente osservato, occorre *attuare un processo di identificazione*, finalizzato a stabilire una distinzione tra ciò che verrà considerato (parte del) supporto e l'ambiente circostante. Questo potrebbe essere ritenuto già un atto informazionale, poiché richiede di specificare appunto un criterio di identificazione, che è, come abbiamo visto, il risultato di un processo di corrispondenza (la cosa è tutt'altro che solo teorica: per molte misurazioni, per esempio, è di fondamentale impor-

tanza poter stabilire *che cosa* si sta misurando, in modo da identificare l'eventuale presenza di effetti indesiderati sulla grandezza in esame, dovuti ad altre grandezze «di influenza», che nel caso di grandezze fisiche sono tipicamente temperature, pressioni, umidità, ...).

In opposizione a ciò, potremmo adottare una posizione che riconosca un ruolo de-finizionale per il processo di corrispondenza: «il supporto oggetto dell'osservazione è *ciò* di cui si è identificata una configurazione». Ma anche ammettendo questa posizione, il punto di vista informativo che abbiamo introdotto ci conduce a distinguere, a proposito dell'atto di osservazione, tra l'evento puramente fisico e quello informativo appunto. Potremmo dire, esemplificativamente: ci conduce a distinguere tra il vedere e il guardare. Il fatto è che il vedere è solo condizione necessaria, ma non sufficiente, per ottenere informazione: si vede senza guardare solo quando l'oggetto non diventa oggetto di interesse, cioè non genera quello spostamento di interesse di cui abbiamo detto appena sopra. Potremmo dire, allora, che *ciò che vediamo sono stati di supporti*, ma *ciò che guardiamo sono configurazioni*.

L'esempio più evidente di questa distinzione è forse proprio quello dei testi scritti. Da quando un individuo ha imparato a leggere, cioè da quando è in grado di applicare un particolare processo di corrispondenza, di fronte a un supporto come questo:

*chemin de fer*

non può non «leggerlo»: l'applicazione di tale processo di corrispondenza ci si impone.

Allora, forse, una linea di risposta al suddetto problema epistemologico può essere così formulata: se ciò che è considerato «dato» è un qualcosa di puramente fisico, allora (fatte salve le precisazioni circa l'identificazione del supporto) il «dato puro» può esistere; ma se «dato» attiene invece anche ad aspetti informativi, allora esso implica l'applicazione di un processo di corrispondenza e quindi è, in questo senso, «carico di teoria»,

di quella teoria che include appunto tale processo di corrispondenza e le condizioni e le modalità della sua applicazione.



## CAPITOLO TREDICESIMO

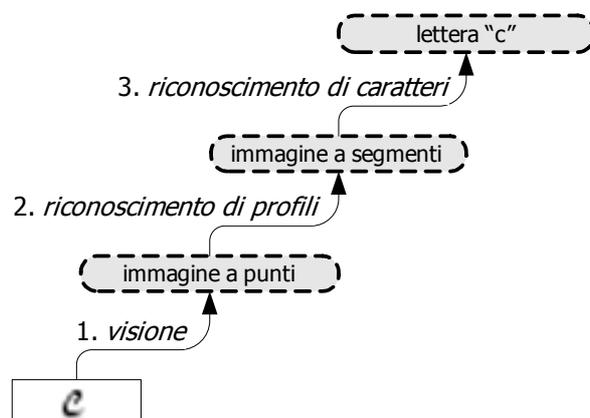
### IL RICONOSCIMENTO DI CONFIGURAZIONI

Continuando ad analizzare la struttura dei processi di corrispondenza a partire da esempi come quelli proposti finora, ci troveremo nella condizione di dover assumere una posizione su alcune tra le più complesse e controverse questioni di filosofia della conoscenza, per esempio se esiste, e nel caso quali caratteristiche ha, una lingua universale della mente umana (il cosiddetto «mentalese»). Per nostra fortuna, questa struttura dei processi di corrispondenza è identicamente presente anche in sistemi tecnologici: è ad essi che ci riferiremo nel seguito, prendendo in esame problemi e corrispondenti soluzioni «implementative» e lasciando ad altri l'eventuale compito di trarne conclusioni generali sulle strategie della conoscenza umana.

Consideriamo un sistema tecnologico che, a partire da un supporto costituito da un foglio contenente un testo scritto, sia finalizzato a generare un file per calcolatore contenente il testo in questione, dunque riconosciuto come tale e non semplicemente come un insieme di macchie di inchiostro su un supporto cartaceo. Questo processo realizza quindi ciò che, se fosse attuato da un essere umano, sarebbe detto «saper leggere», una competenza non del tutto banale, se ricordiamo che per vari anni i bambini *vedono* ma appunto *non leggono* (per semplicità arrestiamo il processo di corrispondenza alla lettura, senza giungere dunque alla *comprensione* del testo letto: senza dubbio l'informazione sul «cosa c'è scritto» è molto più povera di quella sul «cosa significa» ma, da quanto è stato considerato finora, possiamo certamente considerare che di informazione si tratti comunque).

Ripetiamo a questo proposito il diagramma introdotto in precedenza, per evidenziare la struttura progressiva del processo di corrispondenza (si noti che l'esempio che segue è partico-

laramente semplice, e non presenta le modalità effettivamente adottate nei sistemi di riconoscimento automatico della scrittura, ben più sofisticate di quanto qui possiamo discutere):

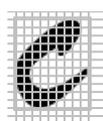


Ognuna delle fasi di cui il processo è costituito è basata su un'attività di *identificazione*, o *riconoscimento*, di *configurazioni* (il termine inglese corrispondente, *pattern recognition*, è forse più noto ed evocativo di quello italiano...). Schematicamente:

- la prima fase

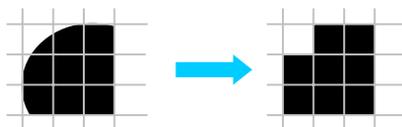


consiste nell'acquisizione mediante scanner dell'immagine sulla carta e nella sua digitalizzazione, cioè nella generazione di una matrice di punti (quelli che in precedenza abbiamo ricordato essere chiamati *pixel*) ottenuti campionando l'immagine di partenza:



(si noti che si tratta di un campionamento rispetto a una variabile spaziale bidimensionale, la superficie dell'immagine,

mentre nella Parte precedente di campionamento avevamo parlato in riferimento alla discretizzazione rispetto al tempo) e quindi quantizzando ogni campione, cioè ogni area identificata dalla griglia, sulla base di una regola di decisione. Nel caso di digitalizzazione binaria, ogni punto della matrice viene trasformato in «acceso» o «spento»: la regola più semplice al riguardo opera separatamente su ogni area e accende il corrispondente punto della matrice se l'area è almeno «abbastanza» scura, per esempio:

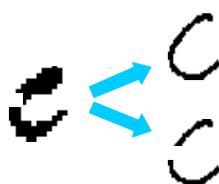


che mostra, messo in pratica, un caso di riconoscimento di sostituibilità di stati: tutte le aree «abbastanza» scure vengono trattate come equivalenti in riferimento alla finalità per cui il sistema è considerato;

- la seconda fase



consiste nella «vettorizzazione» della matrice di pixel, cioè nella sua trasformazione in un insieme di segmenti (o, più in generale, in una o più curve descritte analiticamente) corrispondenti al profilo dell'immagine acquisita. Anche in questo caso, il riconoscimento della configurazione non è «oggettivo» ma è guidato dalla finalità, nel senso che al variare della finalità una stessa matrice di pixel potrebbe identificare configurazioni diverse. Per esempio potrebbe essere che:



in base al fatto che la regola di riconoscimento ipotizzi o meno la connessione dell'insieme dei segmenti (nell'alfabeto italiano ogni lettera è infatti identificata da un insieme connesso di segmenti, se non fosse per il «puntino sulla i» e per gli accenti);

- la terza fase



consiste finalmente nel riconoscimento del carattere alfanumerico corrispondente al profilo precedentemente identificato (quando realizzate da un sistema software, questa fase e la precedente vengono usualmente chiamate *optical character recognition*, OCR).

*Questa successione di fasi è esemplificativa di un processo generale che si potrebbe chiamare di strutturazione dell'informazione. Rimandiamo all'Appendice di questa Parte per un'ulteriore discussione e altri esempi sull'argomento.*

Nuovamente, uno stesso profilo potrebbe identificare molteplici entità di informazione, ed è dunque solo l'assunzione di una specifica finalità che mette in grado di decidere in presenza di ambiguità. Per esempio la configurazione:

10

potrebbe identificare un pronome personale, «io», o un numero, «dieci». In questo secondo caso, il fatto che la *stessa* successione di cifre, 1 0, possa identificare numeri diversi al variare della base del sistema di numerazione adottato (dieci per la usuale base dieci, ma anche due per la base due, e in generale  $n$  per ogni base  $n$ ) mostra la necessità di un'ulteriore fase di riconoscimento, da successioni di cifre a numeri, la cui regola di decisione è proprio la scelta del sistema di numerazione. Si tratta, evidentemente, di una regola analoga alla scelta della lingua da utilizzare per identificare il significato di una successione di

caratteri alfabetici (gli esempi sono noti e numerosi: «care» può essere il femminile plurale di «caro», in italiano, oppure una forma coniugata di «to care», in inglese).

Un processo di corrispondenza di questo genere, certamente esemplificativo di molti processi che abitualmente attuiamo in modo del tutto inconsapevole, è dunque assai complesso: ogni fase ha in sé delle ambiguità nel riconoscimento delle configurazioni, ed è solamente grazie all'adozione di una *logica di default* (le cifre sono decimali, i testi sono in italiano, ...) che riusciamo a gestire tale complessità. I molti e noti esempi di riorientamento gestaltico sono appunto interpretabili a partire da ambiguità nel riconoscimento di configurazioni. Per contribuire con un semplice esempio, che riprende un tema appena discusso, di fronte a:

$$\begin{array}{r} 9 + \\ 7 = \\ \hline \end{array}$$

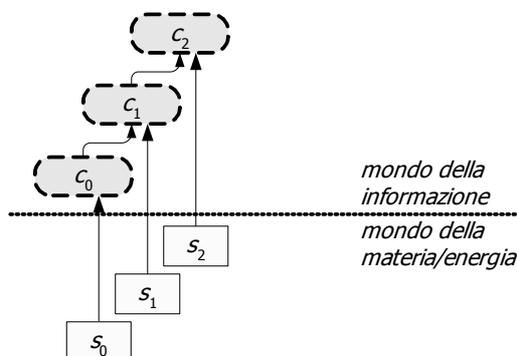

ci prepariamo a un risultato diverso da:

$$\begin{array}{r} 9 + \\ 7 = \\ \hline 10 \end{array}$$

ed è solamente dopo aver colto la necessità di un cambio della regola di riconoscimento di default che giungiamo ad ammettere la correttezza dell'espressione (in base sedici, il numero sedici si scrive «10» appunto...).

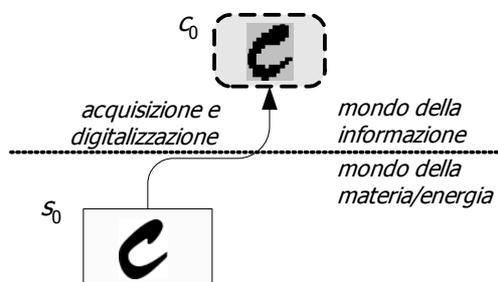
*Ancora sul ruolo dei supporti nei processi di corrispondenza*

In precedenza abbiamo rappresentato la successione delle configurazioni intermedie di un processo di corrispondenza in questo modo:



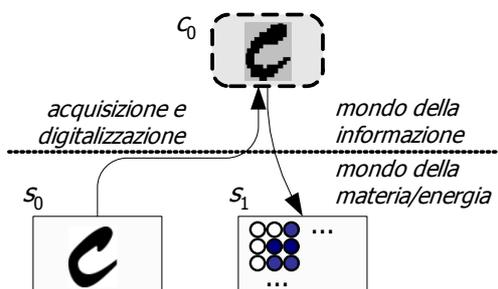
mettendo così in evidenza che i prodotti dell'attività di riconoscimento di configurazioni, in quanto entità di informazione, richiedono un supporto per essere gestite. Questo diagramma, «orientato all'informazione», è però incompleto dal punto di vista del ruolo che i supporti  $s_0, s_1, \dots$  giocano nel processo.

Tornando all'esempio di un sistema OCR, prendiamo in considerazione la prima fase del processo, che porta all'identificazione della configurazione  $c_0$  a partire dallo stato  $s_0$ , per esempio:



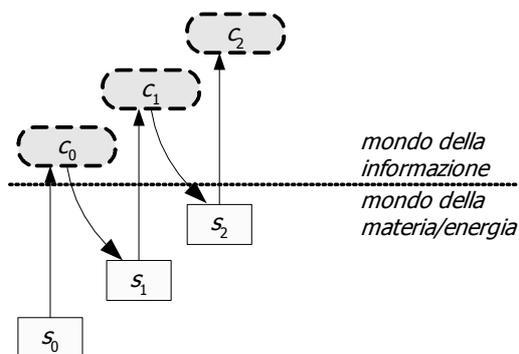
Una volta riconosciuta, la configurazione  $c_0$  deve essere memorizzata in un supporto, che non può essere  $s_0$  stesso, dato che su di esso si è dovuto appunto applicare un processo di corrispondenza per giungere a  $c_0$ . Il nuovo supporto in questo caso po-

trebbe essere semplicemente una matrice di bit<sub>m</sub> ● e ○, ognuno corrispondente a un pixel dell'immagine digitalizzata secondo la regola ● → pixel acceso; ○ → pixel spento. Dunque:



È a partire da questo supporto, nello stato  $s_1$ , che potrà essere attivata la successiva fase di riconoscimento, che porterà all'identificazione della configurazione  $c_1$ , e così via.

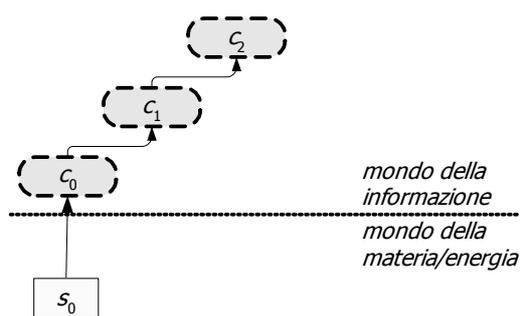
Il diagramma precedente può allora essere riformulato in questo modo:



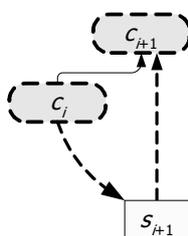
in cui le frecce da  $s_i$  a  $c_i$ , da materia/energia a informazione, rappresentano la relazione di identificazione, come nel caso «lo stato  $s_0$  identifica la configurazione  $c_0$ », e le frecce da  $c_i$  a  $s_{i+1}$ , da informazione a materia/energia, rappresentano la relazione di codifica, come nel caso «la configurazione  $c_0$  è codificata in un supporto nello stato  $s_1$ ».

Possiamo considerare questo come il *diagramma completo* di un processo di corrispondenza. A partire da esso sono ricavabili:

- la versione «orientata all'informazione»:

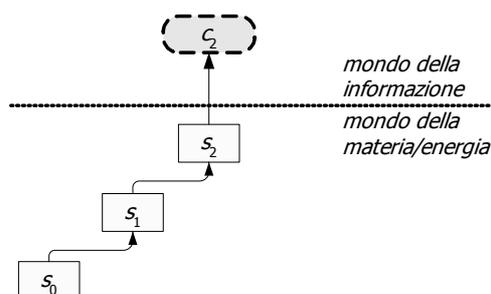


che mantiene sottintesa la presenza dei supporti intermedi grazie alle equivalenze (in algebra si parla al riguardo di «diagrammi commutativi»: all'entità di arrivo si può giungere indifferentemente per il percorso diretto o per quello mediato):

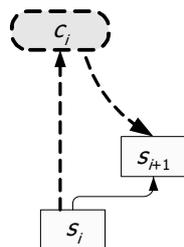


secondo cui la transizione da una configurazione  $c_i$  alla successiva  $c_{i+1}$  equivale alla memorizzazione di  $c_i$  in un supporto  $s_{i+1}$  e quindi nell'identificazione di  $c_{i+1}$  a partire da esso:  
*trasformazione informazionale = codifica + identificazione;*

- la versione «orientata alla materia/energia»:



che mantiene sottintesa la presenza delle configurazioni intermedie grazie alle equivalenze:



secondo cui la transizione da un supporto  $s_i$  al successivo  $s_{i+1}$  equivale all'identificazione di una configurazione  $c_i$  a partire da  $s_i$  e quindi nella memorizzazione di  $c_i$  nel supporto  $s_{i+1}$ :  
*trasformazione materiale = identificazione + memorizzazione.*

Una ragione di interesse per queste due versioni parziali del diagramma completo è che propongono una chiara raffigurazione delle due interpretazioni estreme circa le modalità di elaborazione dell'informazione proprie degli esseri umani e dei sistemi artificiali (come i calcolatori) rispettivamente:

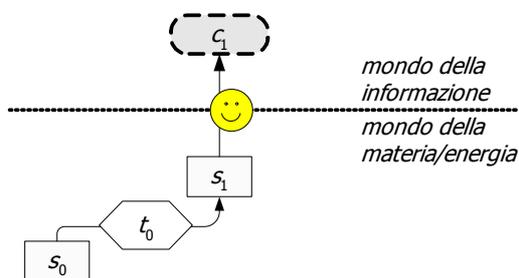
- la versione «orientata all'informazione» prescinde, nella schematizzazione del processo, dalla presenza dei supporti intermedi, proprio quello che ogni essere umano assume di fare, e psicologicamente fa, quando effettua un'elaborazione «a mente» e si focalizza sul livello informazionale e non sulla materia/energia sottostante, che gli rimane (per altro inevitabilmente: nessuno di noi ha una percezione delle trasformazioni fisiche corrispondenti alle attività mentali) inaccessibile; la materia/energia è, eventualmente, presente solo nella prima fase del processo, a rappresentare lo stimolo iniziale da cui l'elaborazione ha origine;
- la versione «orientata alla materia/energia» prescinde, nella schematizzazione del processo, dalla presenza di configurazioni intermedie, proprio quello che sostiene una visione esclusivamente materialistica del funzionamento dei calcolatori («non *capiscono* alcunché: trasformano solo stati fisici in altri stati fisici»); l'informazione interviene, eventualmente,

solo nell'ultima fase del processo, a rappresentare l'intervento di un essere umano che interpreta come informazione lo stato finale a cui il processo è giunto.

Questa presentazione mostra dunque la complementarità delle due versioni.

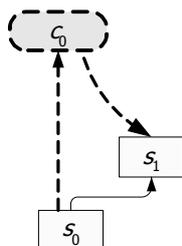
*Processi di corrispondenza in più fasi: una conseguenza*

Come abbiamo visto, per attuare un processo di corrispondenza sono necessarie delle *competenze*, che in un sistema tecnologico per la gestione dell'informazione si concretizzano tradizionalmente in *funzionalità per la trasformazione della materia/energia*. Nel caso più semplice di un processo di corrispondenza realizzato con una sola fase intermedia:

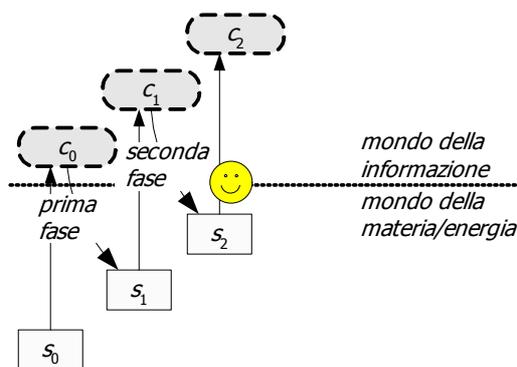


il sistema tecnologico  $t_0$  trasforma il supporto iniziale  $s_0$  in un altro,  $s_1$ , adatto all'accesso diretto da parte di un essere umano che, accedendo a esso, ne identifica la configurazione  $c_1$ .

È questo il caso, per esempio, di un riproduttore di audiocassette o di un apparecchio telefonico, che trasformano rispettivamente lo stato di magnetizzazione del nastro e il segnale elettrico che giunge dalla linea (il supporto  $s_0$ ) in un segnale udibile da esseri umani (il supporto  $s_1$ ), ai quali rimane il compito di identificare l'informazione portata (la configurazione  $c_1$ ). In mancanza di apparati sensoriali adatti allo scopo, gli esseri umani non sono in grado di accedere informazionalmente al supporto  $s_0$ , (non possono ascoltare la musica memorizzata nel nastro toccandolo, per esempio), e quindi la struttura della trasformazione  $t_0$ :



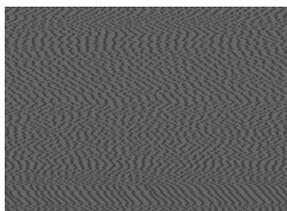
rimane loro nascosta. È per questo che il punto di vista più abituale sul funzionamento di questi sistemi tecnologici è basato appunto sulla versione del diagramma del processo di corrispondenza che abbiamo impiegato: quella «orientata alla materia/energia». *Come se* la trasformazione da  $s_0$  a  $s_1$  fosse puramente materiale. La possibilità di scandire i processi di corrispondenza in più fasi intermedie ha un'importante conseguenza per i sistemi tecnologici in cui tali processi sono implementati e per il modo con cui il funzionamento di tali sistemi è interpretabile. Se consideriamo il caso di un processo di corrispondenza realizzato in due fasi:



possiamo supporre che a ognuna di esse sia dedicato uno specifico sottosistema tecnologico, ancora lasciando l'eventuale identificazione conclusiva, dal supporto  $s_2$  alla configurazione  $c_2$ , all'intervento di un essere umano.

Per concretezza, prendiamo in esame un calcolatore, che opera a partire da dati presenti su un'unità di memoria che gli è accessibile (potrebbe essere sia un disco sia la memoria di lavoro interna al calcolatore stesso). Tale unità di memoria, nello stato fisico in cui si trova istante per istante, costituisce il sup-

porto iniziale  $s_0$ . Possiamo supporre (è chiaro che qui non stiamo facendo un discorso sull'ingegneria del funzionamento di un calcolatore elettronico...) che il risultato dell'accesso a  $s_0$  sia l'identificazione della configurazione  $c_0$  nella forma di una successione di «zeri» e «uni». Su tale successione opera un programma, per esempio un word processor, che riconosce in essa la configurazione  $c_1$ , per esempio una successione di caratteri alfanumerici. Il sistema tecnologico trasforma infine tali caratteri in punti luminosi su uno schermo, il supporto  $s_2$ , finalmente usufruibile da parte di un essere umano. Un discorso del tutto analogo avremmo potuto fare se avessimo preso in esame non un word processor che identifica negli «zeri e uni» caratteri alfanumerici, ma, per esempio, un programma per l'editing audio o di immagini, che in *quella stessa* successione di simboli binari riconoscerebbero appunto un brano musicale o un'immagine. Tanto che con un calcolatore si può «suonare un'immagine» o «vedere della musica». Il file in cui è memorizzato un suono di una campana è per esempio visualizzabile così:



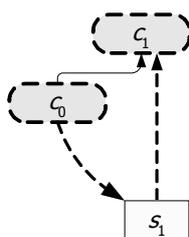
(secondo la regola, non molto significativa in verità, per cui ogni livello di volume del suono viene interpretato come un livello di grigio dell'immagine e il vettore, unidimensionale, che contiene i livelli di volume viene segmentato e quindi visualizzato in forma bidimensionale) oppure così:

4 -2 -3 -12 -3 0 12 10 16 4 1 -10 -7 -11 ...

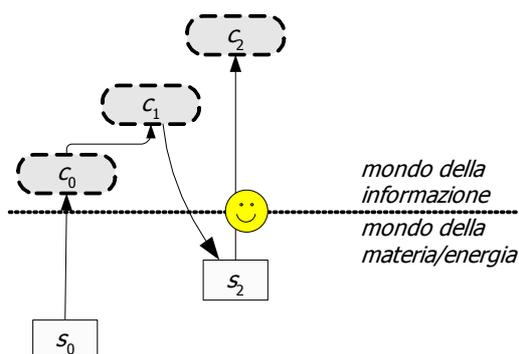
(secondo la regola per cui ogni livello di volume del suono viene visualizzato come numero intero) semplicemente cambiando il processo di identificazione che viene applicato alla configurazione  $c_0$ , cioè al file.

Si sarà notato che nella descrizione precedente non abbiamo fatto menzione del supporto intermedio  $s_1$ . La ragione è analo-

ga a quella che avevamo addotto a proposito del processo di corrispondenza «a una fase intermedia» per mantenere nascosta la struttura della trasformazione e in particolare la configurazione intermedia  $c_0$ : si era detto che tale configurazione, seppur presente, poteva essere giudicata irrilevante per descrivere il comportamento informazionale del sistema tecnologico. Nel caso del processo di corrispondenza «a due fasi intermedie» appena discusso, la logica è concettualmente la stessa, ma invertita: abbiamo parlato di una trasformazione della configurazione iniziale  $c_0$  a quella successiva  $c_1$ , senza dover citare il supporto intermedio  $s_1$ :



avendo fatto riferimento a una versione «orientata all'informazione» del diagramma del processo di corrispondenza:



in cui il processo realizzato dal sistema tecnologico appare costituito in effetti da *tre* fasi:

1. da  $s_0$  a  $c_0$ : l'identificazione di una configurazione a partire dal supporto iniziale richiede un sottosistema di interfaccia con il mondo della materia/energia;
2. da  $c_0$  a  $c_1$ : la fase è puramente informazionale (e infatti negli esempi proposti abbiamo supposto che possa essere effettuata per via software): il supporto intermedio  $s_1$  è irrilevante per la descrizione del comportamento informazionale del sistema;
3. da  $c_1$  a  $s_2$ : la memorizzazione di uno stato sul supporto finale richiede un sottosistema di interfaccia con il mondo della materia/energia.

Questo diagramma è ulteriormente generalizzabile riconoscendo che la fase intermedia può essere organizzata in una successione di sotto-fasi, tutte puramente informazionali, in analogia a quelle che abbiamo considerato inizialmente.

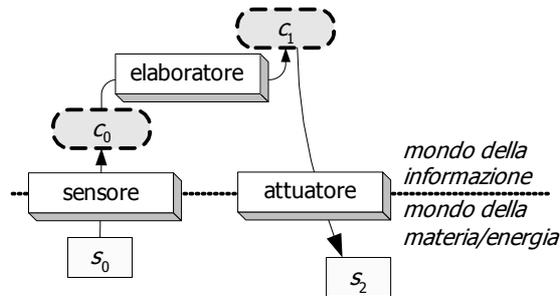
Con ciò siamo pronti per cercare di rispondere alla domanda che sta alla base di questa Parte.

## CAPITOLO QUATTORDICESIMO

### PERCHÉ IL MULTIMEDIALE OGGI, DUNQUE?

I processi di corrispondenza di cui abbiamo appena discusso possono essere presentati, dal punto di vista della loro struttura, in questo modo:

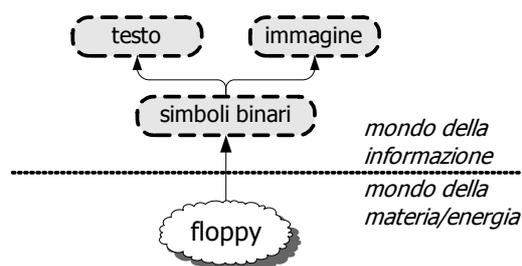
1. dapprima *si estrae informazione dal mondo fisico*, mediante un «sensore»;
2. quindi *si elabora informazione*, mediante un «elaboratore»;
3. infine *si modifica il mondo fisico in funzione dell'informazione elaborata*, mediante un «attuatore».



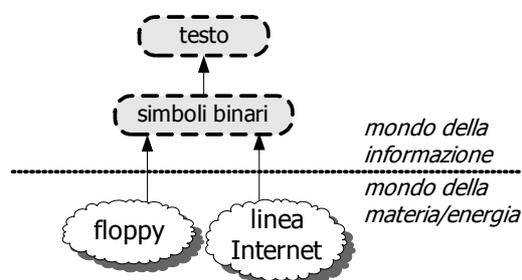
Queste tre (macro-)fasi sono concatenate l'una all'altra, poiché ognuna fornisce l'input alla successiva. Il ruolo della prima fase è dunque cruciale, poiché può rendere l'elaborazione indipendente dalle caratteristiche specifiche del supporto fisico da cui l'informazione da elaborare è stata estratta. Questa indipendenza si manifesta in due modi complementari:

- uno stesso supporto può portare informazione diversa semplicemente cambiando la regola con cui viene elaborata l'informazione estratta durante la prima fase; per esempio, i

simboli binari letti da un floppy disc possono essere interpretati indifferentemente come un testo o un'immagine;



- supporti diversi possono portare la stessa informazione semplicemente cambiando la regola con cui viene estratta informazione durante la prima fase; per esempio, i simboli binari letti da un floppy disc o da una linea di trasmissione per Internet possono essere entrambi interpretati come un testo;

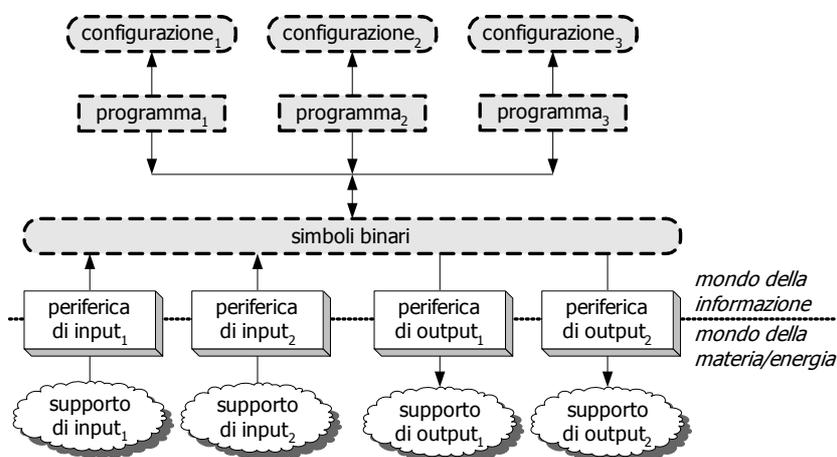


Come abbiamo considerato ampiamente nella Parte precedente, è proprio il digitale a garantire l'indipendenza dell'informazione dal mondo fisico: una volta che l'informazione sia stata acquisita, a uso dell'elaboratore, nella forma di simboli binari, ogni specificità del supporto diventa irrilevante. Ed è grazie al digitale, dunque, che un sistema tecnologico per l'elaborazione dell'informazione può essere contemporaneamente *unico e molteplice*: un solo elaboratore in quanto sistema fisico capace di elaborazione differenziata con l'impiego di processi di corrispondenza diversi.

Potremmo dire: *un solo sistema hardware per molti sistemi software*. È interessante notare che ciò è possibile per il fatto che l'elaboratore opera integralmente nel mondo dell'informa-

zione, cioè appunto che il software è sostanzialmente indipendente dall'hardware «sottostante». E infatti i due sottosistemi che mantengono un contatto diretto con il mondo fisico, i sensori e gli attuatori, non godono di questa caratteristica, tanto che un tipico calcolatore, specialmente se definito «multimediale», è dotato di molteplici periferiche di input (tastiera, mouse, scanner, microfono, telecamera, ...) e di output (schermo video, stampante, altoparlanti, ...). Ognuna di esse ha il ruolo di sistema dedicato all'interfaccia tra mondo fisico e mondo dell'informazione, e dunque trasforma stati di supporti in quelle particolari configurazioni che sono le successioni di simboli binari (le periferiche di input) o viceversa (le periferiche di output).

I diagrammi precedenti possono essere allora integrati e specificati nel caso dei calcolatori, la cui struttura funzionale è presentabile come segue:



dove i diversi programmi, entità software e quindi puramente informativi, vengono eseguiti dall'unico elaboratore, che è parte del mondo fisico e la cui presenza, pur ovviamente necessaria, è, per le ragioni discusse, irrilevante per la caratterizzazione informazionale del sistema. E infatti l'utente di un calcolatore, che pure interagisce in modo diretto con la parte hardware del calcolatore stesso, per descrivere il suo operato adotta un modello di tipo informazionale, e fa quindi asserzioni

del tipo «sullo schermo c'è scritto...» e non «lo schermo ha i pixel... accesi».

Come si vede, la multi-medialità, cioè la capacità di gestire processi di corrispondenza molteplici, è una caratteristica di quei sistemi che elaborano informazione non direttamente attraverso modificazioni della loro struttura fisica, ma «per via software». Ogni calcolatore *general purpose* è dunque, in questo senso, multimediale. Possiamo immaginare, d'altra parte, l'esistenza di una sorta di «scala della multimedialità», esemplificabile nella capacità di gestire processi di corrispondenza per l'identificazione di informazione:

- A. solo testuale e in una sola lingua;
- B. solo testuale, ma in lingue/sistemi simbolici diversi (per esempio testi in italiano affiancati a formule matematiche);
- C. testuale e grafica, ma ancora basata solo sulla percezione ottica (per esempio testi con figure);
- D. testuale, grafica, ma anche sonora, e magari tattile e olfattiva (per esempio testi con figure e commenti sonori).

Se la tipologia A potrebbe essere un esempio di mono-medialità, già la tipologia B, e ancor più la C, è di tipo multimediale. La tipologia D, oltre che multimediale, è multisensoriale, dato che richiede all'utente umano l'impiego di sistemi sensoriali diversi, e corrispondentemente al calcolatore che gestisce l'informazione l'impiego di molteplici attuatori.

Nel passaggio dalla tipologia B alla tipologia D cresce di importanza il ruolo delle periferiche: è sufficiente un sottosistema di visualizzazione qualsiasi per la tipologia B; tale sottosistema deve essere dotato di funzionalità di visualizzazione grafica nel caso della tipologia C; occorre affiancare a questo sottosistema altre periferiche di output nel caso della tipologia D.

In senso proprio, già i primi mainframe erano dunque multimediali. Perché la multisensorialità potesse diffondersi occorreva però attendere calcolatori basati su un'architettura diversa, in grado di integrare in modo efficiente periferiche molteplici con un'unica unità di elaborazione: come sappiamo, questo passo è stato compiuto dai personal computer.

## Appendice

### Considerazioni sulla strutturazione dell'informazione

La successione di attività di riconoscimento di configurazioni introdotta in questa Parte è solo un esempio di un processo generale, che si potrebbe chiamare di *strutturazione dell'informazione*. Tale generalità emerge con chiarezza nel confronto delle modalità di progressiva strutturazione dell'informazione a partire da supporti che coinvolgono apparati sensoriali diversi, per esempio vista e udito. Schematicamente:

A partire da...	le prime configurazioni riconosciute sono...	le successive configurazioni riconosciute sono...	per arrivare a...
inchiostro su carta	pixel organizzati in una matrice bidimensionale	curve descritte analiticamente	figure, caratteri scritti (e quindi parole, frasi, ...)
onde sonore	livelli di intensità sonora organizzati in un vettore	componenti armoniche descritte analiticamente	musica, fonemi (e quindi parole, frasi, ...)

Qualche spiegazione è forse utile per questo secondo caso.

Il sistema fisico di partenza è un segnale sonoro di durata definita, diciamo 10 secondi. Una volta acquisito mediante un opportuno sensore (potrebbe essere un microfono), il segnale viene digitalizzato, in funzione di due parametri: il numero di campioni per unità di tempo e il numero di livelli di volume in cui ogni campione può essere quantizzato (per un segnale da gestire con una buona qualità, gli ordini di grandezza tipici per questi parametri sono  $10^4$  campioni al secondo e  $10^4$  livelli possibili per campione). A seguito di questa fase, che viene solitamente chiamata *pulse code modulation*, PCM, il segnale risulta espresso in un vettore temporale di numeri, ognuno corrispondente al livello quantizzato di volume di un campione. A partire da tale vettore, la fase successiva è finalizzata al riconoscimento

delle componenti armoniche presenti nel segnale (secondo un fondamentale teorema formulato all'inizio del XIX secolo da Fourier, *ogni* segnale reale è rappresentabile come la somma di segnali sinusoidali, ognuno caratterizzato da una propria frequenza e ampiezza, detti appunto «componenti armoniche» del segnale di partenza), che vengono quindi espresse ognuna in una forma del tipo «sinusoide di frequenza  $f$  e ampiezza  $a$  dal tempo  $t_1$  al tempo  $t_2$ », corrispondente a qualcosa del tipo «do in terza ottava a volume 90% dal tempo 2,5 secondi al tempo 4,0 secondi» (si basa su un principio di questo genere lo standard *Musical Instrument Digital Interface*, MIDI).

In entrambi i casi, inchiostro su carta e onde sonore, il processo di riconoscimento è dunque rappresentabile come:



Nelle configurazioni basate su una codifica non strutturata, l'informazione a cui, ultimamente, le configurazioni rinviano rimane implicita, seppur presente: un programma in grado di accedere a una matrice di pixel ottiene da essa informazione appunto solo sui singoli pixel e non sull'oggetto visualizzato. E infatti tale programma può compiere sull'immagine solo operazioni pixel per pixel, come «scurisci ulteriormente tutti i pixel scuri e schiarisci ulteriormente tutti i pixel chiari» (un'operazione di aumento del contrasto, dunque), oppure «inverti il colore di ogni pixel rispetto alla scala cromatica impiegata» (un'operazione di passaggio all'immagine negativa, dunque). Così, l'immagine:



può venire trasformata in:



oppure in:



ma *non* in:



un'operazione che avrebbe comportato il riconoscimento delle entità grafiche «A», «B», «C» e «D» come tali («C» e «D» sono state eliminate e «B» è stata spostata rispetto ad «A»).

Analogamente, un programma che tratta vettori di livelli di volume sonoro in formato PCM può essere utilizzato per un'operazione come l'aumento del volume, corrispondente a un incremento del valore numerico di ogni campione calcolato campione per campione, ma *non* per decidere se il suono corrisponde alla parola «avanti» oppure «stop».

Per operazioni di quest'altro genere è dunque necessaria un'ulteriore fase di riconoscimento, che porta da entità di in-

formazione elementari, come pixel e livelli di volume, a entità di informazione complesse, come caratteri e fonemi. Mentre la prima fase del processo di riconoscimento è comunque realizzabile, a prescindere dalle caratteristiche del supporto di partenza, la fase successiva, corrispondente alla strutturazione dell'informazione ottenuta dalla prima fase, richiede competenze specifiche al dominio delle entità identificate. Uno scanner o un microfono accoppiati a un programma di digitalizzazione sono sempre in grado di operare per produrre dell'informazione con codifica digitale non strutturata: per strutturare tale informazione occorrono invece sistemi software specifici, per esempio sistemi OCR per riconoscere caratteri scritti (ma del software OCR è totalmente inutile di fronte all'immagine di un paesaggio...), e sistemi di riconoscimento vocale per riconoscere fonemi.

È interessante notare che la fase che abbiamo chiamato di *strutturazione* dell'informazione può essere intesa come una modalità di compressione dei dati. Come esempio estremo, consideriamo il caso di 10 secondi di musica in cui si mantiene costante il suono di una singola nota: adottando i parametri di digitalizzazione tipici dei CD audio (circa 50000 campioni per secondo, 2 byte per campione), tale informazione richiederebbe un supporto di circa 1 Mbyte ( $50000 \times 2 \times 10$ ) in modalità PCM, cioè digitale non strutturata, mentre il corrispondente file MIDI, caratteristico della modalità digitale strutturata, avrebbe una dimensione di pochi byte, quelli appunto necessari per memorizzare un'informazione per tipo «do in terza ottava per 10 secondi». Tale compressione si ottiene solo grazie all'applicazione di una competenza a proposito del (nel caso di sistemi tecnologici: di un algoritmo per il) riconoscimento di configurazioni.

PARTE QUARTA  
GESTIRE INFORMAZIONE

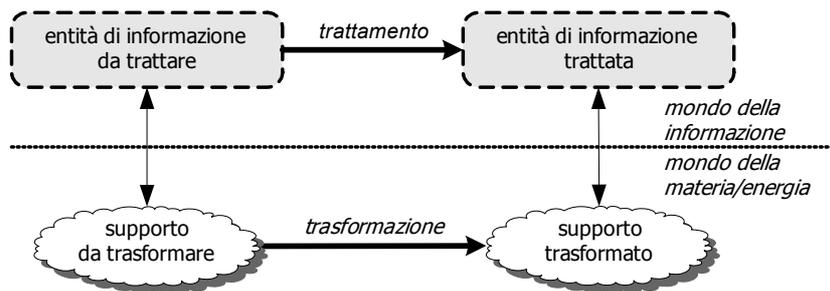


## CAPITOLO QUINDICESIMO

### TRASFORMAZIONE DI SUPPORTI E TRATTAMENTO DI ENTITÀ DI INFORMAZIONE

Una volta che siano state riconosciute come configurazioni di supporti, le entità di informazione possono diventare oggetto di trattamento, mediante operazioni che intervenendo su di esse producono risultati che sono a loro volta entità di informazione. In questo senso il trattamento a cui le entità di informazione «1» e «2» vengono sottoposte con l'applicazione dell'operatore «+» produce come risultato l'entità di informazione «3».

In quanto parti del mondo dell'informazione, sia le entità trattate sia le entità risultato del trattamento devono avere un corrispondente in stati di un supporto: il *trattamento di entità di informazione* corrisponde perciò alla *trasformazione dei supporti* su cui tali entità sono mantenute:

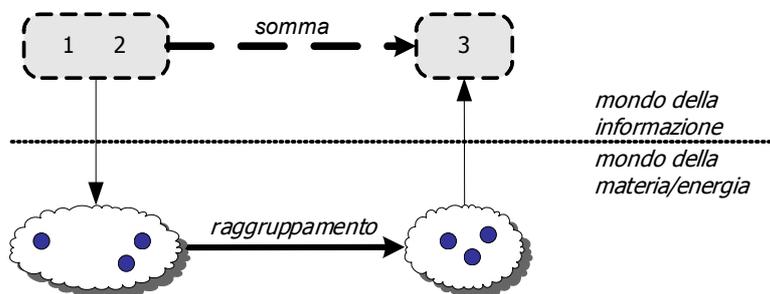


(vale forse la pena di accennare al fatto che questi termini, «trattamento» di informazione e «trasformazione» di sistemi fisici, non sono standard: li abbiamo adottati proprio a causa dell'assenza di una terminologia condivisa e stabile a riguardo di questi temi).

La duplicità di interpretazione che abbiamo messo in luce nella Parte precedente si ripropone a proposito di questo diagramma:

- lo scopo di trattare entità di informazione viene raggiunto attraverso la trasformazione dei supporti su cui tali entità di informazione sono portate.

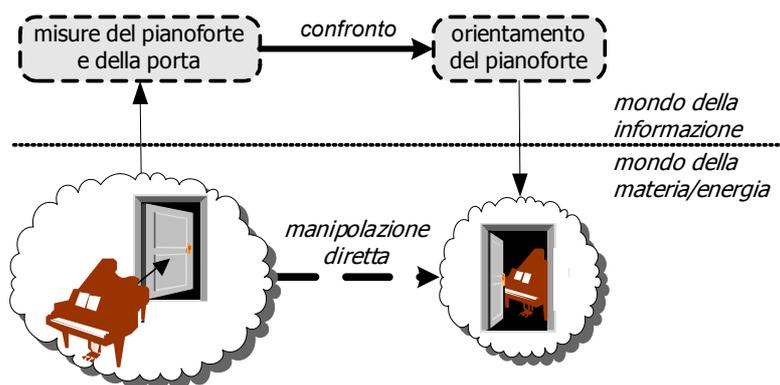
Vale per questo l'esempio appena citato:



che schematizza il tipico impiego di uno strumento come l'abaco: per effettuare la somma di due numeri li si *codifica* in uno stato del supporto fisico, quindi si opera su di esso trasformandolo, e infine si *decodifica* lo stato trasformato per ottenere l'entità di informazione corrispondente alla somma dei due numeri;

- lo scopo di trasformare cose può essere raggiunto non solo attraverso la manipolazione diretta delle cose, ma anche in modo indiretto, attraverso la mediazione ottenuta dal trattamento di entità di informazione.

Un esempio di questa seconda interpretazione è il seguente. Volendo far passare un pianoforte da una porta, si può operare per tentativi, cercando un orientamento del pianoforte che ne consenta il passaggio attraverso la porta stessa. Ma si possono anche misurare le dimensioni della porta e del pianoforte, confrontando quindi i valori ottenuti per trovare, operando «a tavolino», la posizione con cui infine orientare il pianoforte per farlo passare dalla porta:



I problemi fondamentali che le due interpretazioni pongono sono, significativamente, inversi:

- nel primo caso occorre trovare un sistema fisico che sia in grado di fungere da supporto per l'informazione data e che sia adeguatamente trasformabile in vista del raggiungimento dello scopo di trattare le entità di informazione (sup)portate. Nell'esempio, è più comodo raggruppare sassolini, i «calcoli» latini, piuttosto che macigni;
- nel secondo caso occorre invece garantire la qualità delle entità di informazione ottenute dal supporto, in modo da assicurare che il risultato del trattamento sia correttamente «propagabile all'indietro» alle cose da trasformare. Nell'esempio, potrebbe non essere sufficiente misurare le dimensioni del pianoforte e della porta «a spanne» per raggiungere una ragionevole certezza sul risultato del confronto compiuto tra le misure.

In entrambi i casi la nostra attenzione si rivolge al tema del trattamento di entità di informazione e delle relazioni fra il trattamento di entità di informazione e le trasformazioni dei relativi supporti.

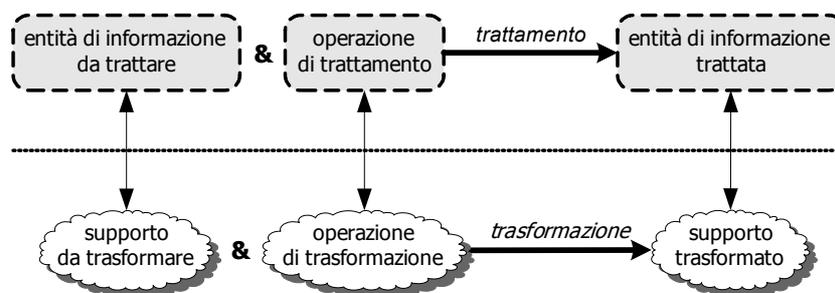
*Le operazioni di trasformazione e di trattamento e le loro relazioni*

Abbiamo dichiarato inizialmente che avremmo usato il termine «cose» per denotare parti spazio-temporali della mate-

ria/energia, senza comunque approfondire l'argomento. Notiamo che sono cose nel senso suddetto anche eventi temporali come azioni, gesti, ...: sono dunque cose non solo i supporti oggetto di operazioni di trasformazione, ma anche le stesse operazioni di trasformazione. Una considerazione analoga vale per le operazioni di trattamento di entità di informazione, che sono a loro volta entità di informazione.

Nel caso della prima interpretazione citata, in cui le cose sono propriamente supporto per le entità di informazione trattate, anche quelle particolari entità di informazione che sono le operazioni di trattamento necessitano di un supporto. Nell'esempio, la somma di numeri viene (sup)portata dall'azione di raggruppamento degli oggetti che identificano ognuno un'unità. Operativamente, ciò corrisponde al fatto che per sommare numeri si raggruppano oggetti.

Se distinguiamo tra la *definizione* delle operazioni e la loro *esecuzione*, possiamo modificare il precedente diagramma in questo modo:



Secondo una terminologia usuale, entità di informazione da trattare e operazioni di trattamento possono essere chiamati *dati* e *istruzioni* rispettivamente. Sia dati sia istruzioni sono dunque parti del mondo dell'informazione, e come tali richiedono un supporto nel mondo della materia/energia: le configurazioni devono essere (sup)portate da stati.

In particolare le istruzioni vengono materializzate in operazioni di trasformazione, con la condizione che le proprietà delle istruzioni devono essere mantenute anche dalle corrispondenti operazioni di trasformazione. È noto, per esempio, che la somma gode della proprietà detta di associatività, per cui è in-

differente l'ordine di esecuzione di una successione di somme:  $1+2+3=(1+2)+3=1+(2+3)$ . Anche l'operazione di raggruppamento che materializza la somma è, a sua volta, associativa; dal punto di vista del risultato finale, è indifferente l'ordine con cui gli oggetti vengono raggruppati:  $(\bullet \overset{\oplus}{\bullet} \bullet \bullet) \overset{\oplus}{\bullet} \bullet \bullet \bullet \overset{\equiv}{\bullet} \bullet \overset{\oplus}{\bullet} (\bullet \bullet \overset{\oplus}{\bullet} \bullet \bullet \bullet)$ , avendo rappresentato con  $\overset{\oplus}{\bullet}$  l'operazione di raggruppamento e con  $\overset{\equiv}{\bullet}$  l'operazione di confronto di equinumerosità tra gruppi di oggetti.

Si potrà ricordare che abbiamo già incontrato questo genere di condizioni quando abbiamo trattato di morfismi tra sistemi relazionali, a proposito del problema generale della misurazione. Ne possiamo concludere che l'insieme dei dati e delle istruzioni costituisce un sistema relazionale, e che condizioni perché un sistema fisico possa fungere da supporto per tali entità di informazione sono (1) che l'insieme degli stati e delle operazioni di trasformazione costituisca a sua volta un sistema relazionale e (2) che tra il sistema relazionale «dell'informazione» e quello «della materia/energia» sia stabilito un morfismo, che garantisce la riproducibilità dell'informazione, dati e istruzioni, mediante il supporto fisico.

#### *Un inserto epistemologico*

Il trattamento dell'informazione, cioè l'esecuzione di istruzioni su dati, è usualmente considerato un'attività propria di quei particolari sistemi che sono le menti umane. Questo peculiare ruolo di mediazione viene espressivamente evidenziato dal cosiddetto «modello dei tre mondi» di Popper. Nella sua ottica dichiaratamente anti-riduzionistica (che noi qui potremmo riassumere così: *le configurazioni non sono epifenomeni di stati*), Popper sostiene l'esistenza di tre *mondi*, nella cui reciproca interazione è immersa l'esperienza umana, e che egli presenta in una prospettiva evolutiva. Nel suo schema:

Mondo 1: il mondo degli oggetti fisici

0. Idrogeno ed elio
1. Gli elementi più pesanti; liquidi e cristalli
2. Organismi viventi

## Mondo 2: il mondo delle esperienze soggettive

3. Sensibilità (coscienza animale)
4. Coscienza di sé e della morte

## Mondo 3: il mondo dei prodotti della mente umana

5. Il linguaggio umano; teorie dell'io e della morte
6. Opere d'arte, di scienza e di tecnologia

Secondo questo modello, la relazione tra mondo 1 e mondo 3 risulta mediata dalla mente umana (che Popper plausibilmente porrebbe come entità basilare del mondo 2), tanto che il mondo 3 viene appunto definito come «il mondo dei prodotti della mente umana» (ci si potrebbe chiedere se il mondo 3 di Popper coincida o meno con quello che qui abbiamo chiamato il mondo dell'informazione; senza voler affrontare la questione, notiamo solamente che entità come le organizzazioni umane, per esempio le associazioni o i partiti politici, verrebbero probabilmente considerate appartenenti al mondo 3, e forse in parte al mondo 2, pur senza essere entità di informazione nel senso di cui ci stiamo occupando qui).

Proprio il fatto che entità come le «opere d'arte, di scienza e di tecnologia», che noi considereremmo entità di informazione, siano classificate come «prodotti della mente umana» solleva la questione della natura del *trattamento automatico dell'informazione*: la presenza, e la progressiva diffusione, di sistemi come i calcolatori, che pensiamo finalizzati al trattamento dell'informazione, cambia qualcosa in questo schema? Possono i calcolatori essere considerati sistemi complementari alle menti umane nella mediazione tra mondo 1 e mondo 3?

Lasciamo ad altri la questione se da un'eventuale risposta affermativa a questi problemi si possa inferire per i calcolatori un ruolo omologo a quello delle menti nel mondo 2, un problema che, come è noto, ha diviso e divide coloro che si occupano di intelligenza artificiale. La nostra attenzione è invece rivolta al versante operativo dei problemi citati: quali sono le caratteristiche proprie del trattamento automatico dell'informazione, e in cosa esso differisce da un trattamento «manuale» dell'informazione stessa? Come vedremo, cruciale per affrontare questi problemi sarà proprio la distinzione tra dati e istruzioni che abbiamo introdotto.

## CAPITOLO SEDICESIMO

### TRATTAMENTO MANUALE E TRATTAMENTO AUTOMATICO DELL'INFORMAZIONE

Gli esseri umani trattano abitualmente informazione in grande quantità, spesso senza sforzo apparente. Ma per almeno due ragioni, sostanzialmente complementari l'una all'altra, tale attività può diventare problematica, se non addirittura irrealizzabile, in assenza di opportuni strumenti di supporto: il problema che implica il trattamento potrebbe superare un certo grado di complessità, o potrebbe prevedere dei vincoli stringenti sulle sue modalità, e in particolare sui tempi, di esecuzione.

Gli *strumenti formali* per il trattamento dell'informazione introdotti nel corso del tempo (ne sono esempi i molti risultati a cui sono giunte discipline come la matematica e la logica) sono stati perciò integrati da *strumenti fisici*, che in quanto supporti per le entità di informazione su cui si opera sono finalizzati a facilitare il trattamento dell'informazione stessa. Abbiamo già incontrato un esempio di questi strumenti: i numeri interi positivi vengono materializzati da insiemi di oggetti, e la somma di numeri viene materializzata dall'operazione di raggruppamento di tali oggetti.

In corrispondenza alla distinzione tra dati e istruzioni, possono essere caratterizzate le due funzioni basilari svolte complementariamente dagli strumenti fisici per il trattamento dell'informazione:

- *la memorizzazione dei dati*, cioè il mantenimento (più o meno permanente) di stati;
- *l'esecuzione di istruzioni*, cioè l'attuazione di operazioni di trasformazione.

Poiché un essere umano è in grado di realizzare entrambe queste funzioni, si configurano varie tipologie di integrazione tra

esseri umani e strumenti fisici (se si preferisce: di uso di strumenti fisici da parte di esseri umani) relativamente al «chi fa che cosa».

Molti strumenti sono in grado di svolgere solo la prima funzione, mentre l'accesso agli stati che memorizzano i dati e la loro trasformazione rimane a carico di esseri umani. È un esempio di questa tipologia il libro (ma avremmo potuto ripetere a questo proposito l'esempio dell'abaco), la struttura informazionale del cui impiego tipico è così rappresentabile:

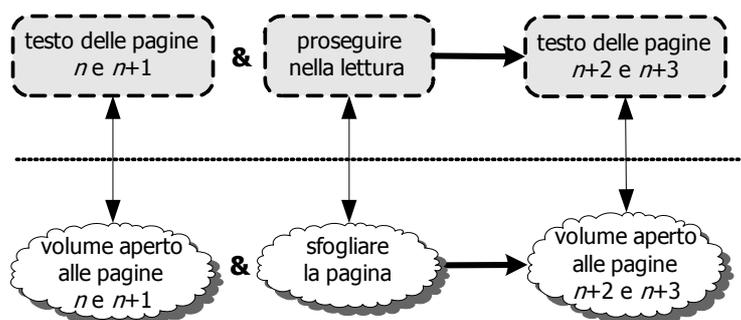
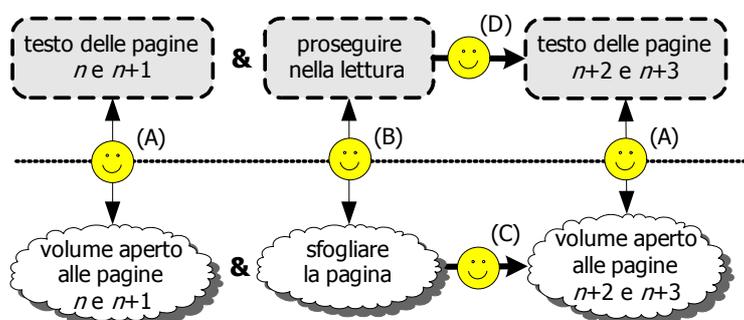


diagramma da cui si vede che la capacità necessaria per l'uso di un libro (ovviamente stiamo parlando dell'uso informazionale, e non, per esempio, di quello che trasforma i libri in oggetti di arredamento...) è duplice: da una parte occorre *saper leggere*, cioè occorre saper riconoscere un testo a partire da macchie di inchiostro su carta (dunque configurazioni da stati: è la capacità rappresentata nel diagramma dalle frecce che uniscono «testi» e «volumi»); dall'altra, la struttura fisica del volume-libro impone che per proseguire la lettura si sia in grado di sfogliare le pagine, un'operazione di trasformazione del supporto fisico corrispondente appunto alla capacità di *proseguire nell'accesso al testo* da una pagina alla successiva, una peculiare operazione di trattamento dell'informazione.

Si può parlare in casi di questo genere di *trattamento manuale* dell'informazione, alludendo alla necessità di un intervento umano diretto per attuare le operazioni di trasformazione che realizzano il trattamento in questione. Caratteristica degli strumenti che rientrano in questa tipologia è perciò l'accessibilità diretta al supporto da parte degli esseri umani, che devono po-

terne ricavare i dati da trattare e dalla cui abilità manuale dipende quindi l'adeguatezza (usiamo questo termine in senso lato, per includere la correttezza, la rapidità, ...) del trattamento: è a tale abilità che sono affidati compiti come l'aprire il volume a una determinata pagina, o l'eseguire la somma di tre addendi spostando successivamente gruppi di palline sull'abaco. Tale ruolo della manualità umana può essere schematizzato così:



dove:

(A): *capacità di leggere*

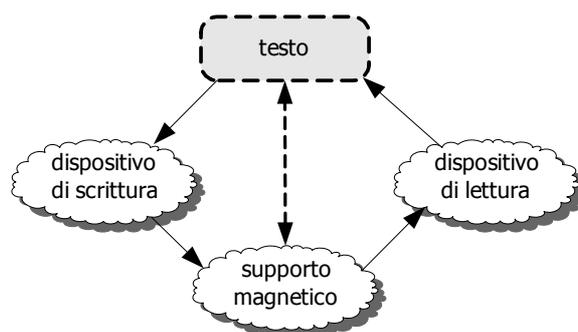
(B): *nozione del fatto che per proseguire la lettura occorre sfogliare la pagina*

(C): *capacità di sfogliare pagina*

(D): *decisione di proseguire nella lettura*

Tutte le attività sono dunque, in questo caso, a carico di esseri umani.

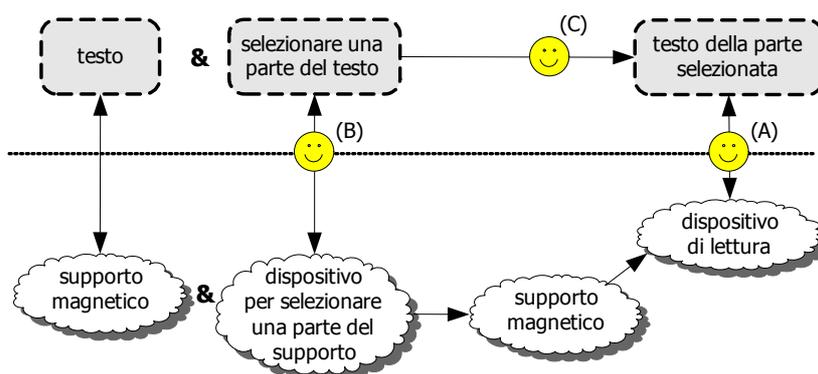
Diversa è la situazione di un oggetto come un supporto magnetico (un nastro o un disco), che per le sue caratteristiche fisiche risulta informazionalmente inaccessibile agli esseri umani, il cui apparato sensoriale non è in grado di discriminare gli stati che tale supporto memorizza. Per rendere informazionalmente accessibile un supporto di questo genere a un utente umano occorre fornirgli un dispositivo per *scrivere sul* supporto, cioè per memorizzare i dati in stati del supporto stesso, e un dispositivo per *leggere dal* supporto, cioè per riottenere un'entità di informazione dallo stato del supporto:



(vale forse la pena di sottolineare che i due termini «scrittura» e «lettura», come i corrispondenti «codifica» e «decodifica», vanno intesi in senso lato: nel caso di informazione audio, per esempio, si parlerebbe di registrazione e riproduzione rispettivamente). I due dispositivi non attuano un vero e proprio trattamento dell'informazione, che infatti rimane inalterata (o almeno dovrebbe rimanerlo, se essi operano correttamente...) al cambio di supporto: si tratta di *trasduttori*, cioè di sistemi di conversione di materia/energia (le due conversioni potrebbero essere per esempio da energia meccanica, la pressione dei tasti di una tastiera, a stati magnetici, e da stati magnetici a energia radiante, emessa da un display). Per essere utilizzabili da esseri umani, tali dispositivi devono essere dotati di un componente finalizzato all'*interfaccia con l'utente* (si usa spesso la forma breve «interfaccia utente», forse per cercare di riprodurre l'inglese *user interface*, UI), in grado da una parte di acquisire l'input dell'utente nel dispositivo di scrittura, dall'altra di fornire all'utente l'output del dispositivo di lettura. Caratteristico di un componente di UI è perciò di essere «a misura di essere umano», cioè di avere uno stato modificabile (per i componenti di input) e percepibile (per i componenti di output) mediante l'apparato sensoriale e motorio umano.

Sistemi di questo genere sono poi tipicamente dotati di funzionalità complementari alla pura trasduzione: i dispositivi per la visualizzazione di testi possono mettere in grado l'utente di «navigare» nel testo, mostrandone solo la parte selezionata (si pensi, per esempio, al sistema televideo); i dispositivi per la riproduzione sonora forniscono usualmente almeno la possibilità di intervenire sul volume del suono prodotto, ma spesso anche

sul suo contenuto armonico grazie a filtri come i controlli sui toni (gli esempi sono in questo caso molteplici, dai riproduttori di audiocassette agli impianti radiofonici). Si tratta, propriamente, di operazioni di trasformazione del supporto, e quindi di trattamento dell'informazione, che vengono dunque compiute da dispositivi fisici dedicati e non più da esseri umani, che appunto non sono in grado di intervenire direttamente sul supporto stesso. A essi rimane generalmente affidato il compito di attivare tali operazioni agendo su componenti di UI quali interruttori, manopole, ... che azionano i dispositivi in questione. Il diagramma diventa allora, per esempio:



dove:

(A): *capacità di leggere*

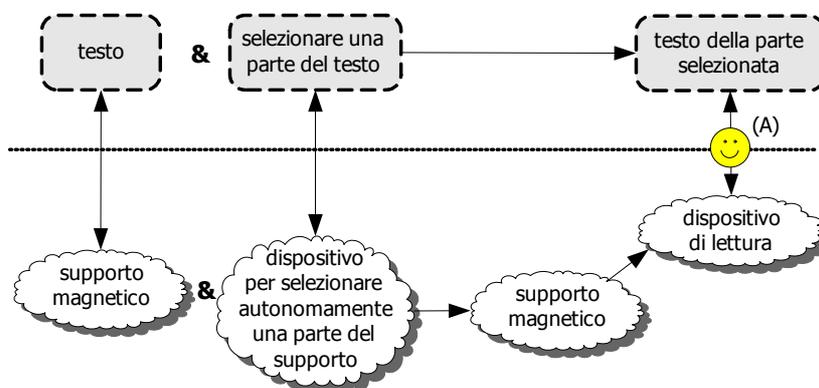
(B): *nozioni sull'azionamento del componente di UI del dispositivo per selezionare una parte del testo*

(C): *decisione di selezionare una parte del testo*

da cui si comprende che il ruolo affidato qui agli esseri umani è ridotto rispetto al caso precedente (assumendo per semplicità che il testo fosse già presente sul supporto magnetico, cosa che inizialmente avrà comunque comportato l'impiego di un opportuno dispositivo di scrittura). Per sistemi di questo genere si può parlare di *trattamento automatico dell'informazione, comandato da un intervento umano*.

La completa automazione del trattamento si ottiene *abilitando il sistema all'autocontrollo*, cioè non solo al trattamento

dell'informazione, ma anche alla decisione circa come e quando trattare l'informazione stessa. Nei casi più semplici, il comportamento che se ne ottiene è predeterminato, per esempio attraverso un dispositivo di temporizzazione che a intervalli di tempo definiti comanda l'esecuzione del trattamento stabilito (per esempio per visualizzare automaticamente la pagina successiva a quella corrente):



dove:

(A): *capacità di leggere*

All'essere umano rimane, a questo punto, solo il ruolo di utente, così che i componenti di interfaccia utente per il controllo del sistema possono essere eliminati in quanto inutili (notiamo, incidentalmente, che gli esseri umani potrebbero mantenere il «meta-controllo» del sistema, attraverso un regolatore del tempo di temporizzazione e un interruttore di accensione/spegnimento generale; molta fantascienza si è sviluppata intorno all'esistenza e al ruolo cruciale di questi componenti, a proposito della possibilità che una piena autofinalizzazione delle macchine diventi ribellione all'essere umano-creatore).

*I sistemi a comportamento dipendente  
dalle condizioni dell'ambiente*

Un sistema per il trattamento dell'informazione può esibire un comportamento di autocontrollo *flessibile*, in quanto in grado di adattarsi alle condizioni dell'ambiente in cui esso si trova. Rispetto al precedente sistema a comportamento completamente automatico ma predeterminato, occorre introdurre in questo caso:

- un dispositivo capace di percepire le variazioni a cui l'ambiente è soggetto, corrispondente perciò a quello che nella Parte precedente abbiamo chiamato un *sensore*;
- un dispositivo che gestisca *la logica di trattamento* scelta, realizzata come una funzione di comando sul dispositivo di trasformazione e dipendente dallo stato dell'ambiente.

Rientrano in questa tipologia, banalmente, i sistemi per la visualizzazione del valore di grandezze misurate nell'ambiente, ma anche, ben più interessanti, i sistemi cosiddetti di *regolazione automatica* del valore delle grandezze misurate. Il tema della regolazione automatica in retroazione (il termine inglese, *feedback*, è noto e molto usato, anche se non sempre appropriatamente) è ampio, relativamente complesso e comunque assai trattato. Ci accontentiamo qui di presentarne un esempio, mirato a mettere ancora una volta in evidenza la relazione tra mondo fisico e mondo dell'informazione. Gli impianti radiofonici montati su alcune automobili sono dotati di un dispositivo di regolazione automatica del volume del suono emesso. L'autocontrollo è finalizzato in questo caso a mantenere costante l'udibilità del suono emesso al variare del rumore di fondo presente nell'abitacolo dell'automobile: quando il rumore aumenta, per esempio a causa di un aumento della velocità dell'auto, il dispositivo provvede a compensare tale incremento, che tenderebbe a «coprire» il suono prodotto dalla radio, aumentando a sua volta l'amplificazione del suono emesso; inversamente, quando il rumore diminuisce, anche il volume del suono viene ridotto.

Dal punto di vista strutturale un sistema di questo genere non è diverso da quello rappresentato nell'ultimo diagramma,

se non perché al posto di (o almeno insieme con) un dispositivo di presentazione, un display nell'esempio, occorre impiegare un dispositivo in grado di intervenire sull'amplificatore della radio per aumentare o diminuire il volume del suono che essa produce.

Proprio come abbiamo discusso nella Parte precedente, un comportamento di questo genere è interpretabile in termini di sole trasformazioni di materia/energia, con l'informazione che entra in gioco solo se e in quanto è presente un essere umano, qui nel ruolo dell'ascoltatore. D'altra parte, il parametro che mediante opportune trasformazioni il sistema regola, in questo caso cercando di mantenerlo costante, è certamente non fisico ma informazionale: il rapporto tra la potenza del segnale emesso dalla radio e la potenza del rumore ambientale. È infatti informazionale e non fisica, in ultima analisi, la distinzione tra cosa è «segnale» e cosa «rumore» (per apprezzare questo ruolo dell'informazione, si potrebbe confrontare il sistema appena presentato con altri sistemi di regolazione automatica, per esempio finalizzati a mantenere costante la velocità di un automobile o la temperatura in una stanza: in questi casi la grandezza regolata è fisica, e non informazionale).

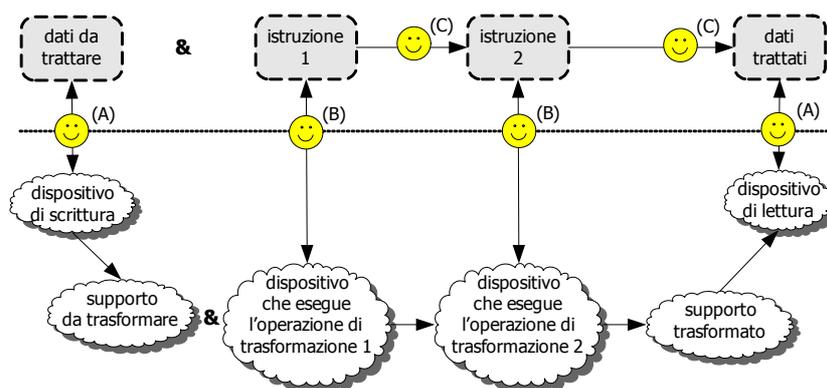
*Sistemi dedicati e sistemi programmabili  
per il trattamento automatico dell'informazione*

La capacità di adattare il proprio comportamento alle mutate condizioni ambientali è certamente una caratteristica propria di un sistema flessibile. Ma accanto a questa esiste una seconda possibile ragione di flessibilità per i sistemi finalizzati al trattamento automatico dell'informazione.

Consideriamo un caso semplice di trattamento, in cui le istruzioni siano operazioni aritmetiche da eseguire su dati numerici. Esempio tipico di un sistema che realizza un trattamento di questo genere è una calcolatrice, che, attraverso una tastiera (cioè un particolare dispositivo di interfaccia utente), consente all'essere umano di specificare sia i dati che l'istruzione con cui operare su di essi. A differenza di quanto accade con l'abaco, il trattamento in questo caso non fa affidamento

sull'abilità manuale dell'utente. È perciò che la calcolatrice può essere propriamente considerata un esempio di quelli che abbiamo chiamato sistemi di trattamento automatico comandato da intervento umano.

Il limite di questa caratteristica, che il sistema debba essere comandato dall'intervento di un essere umano, emerge con chiarezza anche solo nell'analisi di un esempio molto semplice come quello, già citato, relativo all'esecuzione della somma di tre addendi: per ottenere il risultato è l'essere umano utente della calcolatrice a dover gestire manualmente la successione delle due istruzioni, così che se le somme successive da eseguire fossero non due ma, per esempio, duecento, anche l'ausilio di una calcolatrice non potrebbe evitare tempi di esecuzione molto lunghi. Sistemi di questo genere sono dunque in grado di memorizzare i dati ed eseguire le istruzioni, ma affidano ancora agli esseri umani l'attivazione dell'esecuzione di ogni istruzione. E così, per esempio (tralasciando, per semplicità, la presenza dell'entità di informazione intermedia e del corrispondente supporto):



dove:

(A): capacità di scrivere / leggere i dati

(B): nozioni sull'azionamento del componente di interfaccia utente del dispositivo per eseguire un'istruzione

(C): decisione di eseguire l'istruzione

Il passo successivo nell'automazione, e nello stesso tempo nell'incremento di flessibilità, di un sistema di questo genere si ottiene dalla considerazione della *natura delle successioni di istruzioni, che sono, a loro volta, entità di informazione*. Ogni successione di istruzioni è infatti interpretabile come una singola istruzione complessa che prende i dati da trattare e produce i dati trattati; la cosa è ben esemplificabile nel caso della successione delle due somme  $1+2+3$ , che possiamo scrivere in notazione prefissa (per evidenziare il fatto che un'istruzione,  $+_2$ , opera su due dati)  $+_2(+_2(1,2),3)$  ma anche  $+_3(1,2,3)$ , ammettendo che l'unica istruzione  $+_3$  operi successivamente sui tre addendi.

Una possibile scelta per automatizzare questo trattamento consiste nel dotare il sistema di un dispositivo dedicato per eseguire l'operazione di trasformazione corrispondente all'istruzione  $+_3$ , e quindi, in effetti, nell'implementare le successioni di istruzioni come istruzioni complesse. In questo modo l'esecuzione di una successione di istruzioni come quella esemplificata risulta automatizzata, ma certamente l'incremento di flessibilità che questo cambiamento comporta per il sistema è modesto: dovendo eseguire 4 somme in successione dovremmo ancora operare manualmente,  $+_2(+_3(1,2,3),4)$ , oppure dovremmo prevedere la realizzazione del dispositivo che implementa l'istruzione  $+_4$ , e così via per la successione di 5, 6, ... somme.

Invece di realizzare fisicamente ogni istruzione come un dispositivo dedicato, si può adottare la strategia alternativa di dotare il sistema per il trattamento automatico dell'informazione di due ulteriori sottosistemi:

- un dispositivo in grado di *fungere da supporto per quelle particolari entità di informazione che sono le successioni di istruzioni*; chiamiamo tale dispositivo «memoria istruzioni» e la successione di istruzioni «programma»;
- un dispositivo in grado di gestire l'esecuzione sequenziale delle istruzioni presenti su tale supporto; chiamiamo tale dispositivo «esecutore».

Se, per brevità e omogeneità, ribattezziamo «memoria dati» il supporto che viene trasformato, in cui vengono scritti i dati da



- *leggendo i dati* trattati, quindi il risultato del trattamento, mediante un dispositivo di lettura.

È evidente la maggiore complessità strutturale di un sistema di questo genere rispetto a ogni altro schematizzato nei diagrammi precedenti. Ma dovrebbe essere altrettanto evidente la maggiore flessibilità che in questo caso è possibile ottenere nel trattamento dell'informazione. In particolare, poiché a ogni istruzione eseguibile deve corrispondere nel sistema un dispositivo in grado di eseguire la corrispondente operazione di trasformazione, è ragionevole, almeno in prima istanza, assumere che il grado di flessibilità del sistema dipenda dalle istruzioni che è effettivamente in grado di eseguire. Non bisogna però dimenticare che un'istruzione potrebbe essere riducibile ad altre, come nel caso già incontrato di  $+_3$  che è riducibile a una successione di due  $+_2$ . Naturalmente potrebbe essere più efficiente, in termini di tempo necessario per completare il trattamento, disporre direttamente per esempio di un dispositivo moltiplicatore invece di dover operare ripetutamente con un dispositivo sommatore (si sta ovviamente alludendo al fatto che  $4 \times 3 = 4 + 4 + 4$ ), ma, grazie a questa riducibilità, anche un sistema che non dispone di un dispositivo moltiplicatore potrebbe essere messo in grado di eseguire moltiplicazioni.

Su questa base si innestano alcuni dei temi che possono a ben diritto essere considerati classici per la scienza dell'informazione (citiamo, solo a titolo di esempio, il problema dell'universalità della computazione: quali istruzioni deve saper eseguire un sistema per essere in grado di eseguire ogni possibile programma di una data classe?): rimandiamo alla ricca letteratura scientifica disponibile per ogni ulteriore approfondimento al riguardo.

#### *La codifica delle istruzioni: un'implicazione*

Perché le successioni di istruzioni che costituiscono i programmi possano essere memorizzate su un supporto fisico, è necessario definire, e quindi attuare, un processo di corrispondenza che metta in grado di identificare ogni istruzione mediante uno

stato (di una parte) della memoria istruzioni. È ragionevole assumere che sull'insieme delle istruzioni che, in questo senso, occorre codificare non sia definita alcuna struttura (anche solo considerando le quattro operazioni aritmetiche elementari, ha senso chiedersi se la somma sia maggiore o minore del prodotto, o quanto distanti siano tra loro?). Per quanto discusso in precedenza, ne segue che il processo di corrispondenza in questione *non può che essere digitale*. Nella situazione, sempre più comune, in cui anche i dati siano stati codificati in forma digitale, ciò suggerisce l'ipotesi di adottare nei due casi, dati e istruzioni, schemi di codifica compatibili dal punto di vista delle modalità di scrittura/lettura sul supporto. La cosa potrebbe essere realizzata operativamente impiegando come memoria un supporto di bit<sub>m</sub> replicati e definendo degli opportuni processi di corrispondenza che identifichino ogni possibile dato da trattare e ogni possibile istruzione con cui trattare i dati mediante una successione di bit<sub>i</sub>. Se, per esempio, le istruzioni possibili fossero solo le quattro citate, si potrebbe scegliere che 00 → somma; 01 → differenza; 10 → prodotto; 11 → rapporto. In questo senso, allo stato ○● di una parte della memoria corrisponderebbe la configurazione 01, a sua volta associata a quella specifica entità di informazione che è l'istruzione di sottrazione.

Il passo ancora successivo è, a questo punto, immediato: perché non memorizzare istruzioni e dati in una *stessa* memoria? Questa opzione, che appare come un dettaglio tecnico, ha invece delle fondamentali conseguenze di natura concettuale, a cui ci limitiamo qui ad accennare, e che, se adeguatamente sviluppate, ci porterebbero a completare questa, che si sarà riconosciuto essere un'introduzione all'architettura concettuale (la cosiddetta *macchina di Von Neumann*) degli attuali sistemi per il trattamento automatico dell'informazione, personal computer e simili. La compresenza di dati e programmi in memoria rende possibile *trattare* le istruzioni di cui i programmi sono costituiti *come fossero dati*, consentendo quindi la realizzazione di programmi finalizzati alla creazione e modifica di programmi (la potremmo chiamare «programmazione automatica»). Si potrebbe perfino giungere a realizzare programmi che modificano se stessi (la potremmo chiamare «auto-programmazione»). Al di là dei pure interessanti scenari tecnologici che questo prospetta,

vogliamo notare che la capacità di auto-modificazione è una caratteristica qualificante dei processi di apprendimento umani: si tratta perciò di una capacità che potrebbe essere considerata necessaria per programmi che ambiscano alla qualifica di *essere intelligenti*.

## CAPITOLO DICIASSETTESIMO

### GESTIRE INFORMAZIONE IN FORMA DIGITALE E MULTIMEDIALE: QUALCHE RIFLESSIONE

Alla conclusione di questo percorso, proviamo a schizzare una carta del territorio che abbiamo esplorato, per cercare di presentarne in modo organizzato le principali caratteristiche.

Il nostro filo conduttore è stato, sostanzialmente, uno solo:

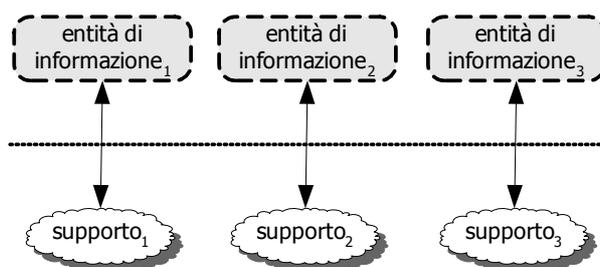
**benché l'informazione non sia riducibile a materia/energia,  
per gestire informazione occorre gestire materia/energia**

e più specificamente:

**per trattare informazione  
occorre trasformare materia/energia.**

La relazione tra materia/energia e informazione, mantenuta attraverso quelli che abbiamo chiamato *processi di corrispondenza*, è dunque cruciale per l'analisi delle potenzialità e dei limiti di ogni sistema per la gestione dell'informazione. E sono proprio i processi di corrispondenza, e non quindi i supporti fisici o le entità di informazione da essi identificate, a essere qualificabili come digitali (piuttosto che analogici) e multimediali (piuttosto che unimediali, termine non molto in uso ma che in questo caso si impone).

I processi di corrispondenza analogici vincolano l'informazione portata, dati da trattare e istruzioni per il trattamento, a supporti specifici, così che per superare l'unimedialità è tipicamente richiesta la compresenza di supporti molteplici, informazionalmente giustapposti l'uno all'altro:

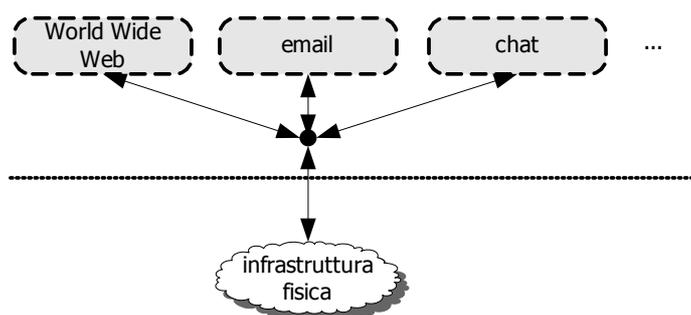


Considerando il supporto (e, in accordo a questo diagramma, la collezione dei supporti giustapposti) come l'infrastruttura preposta alla gestione dell'informazione, riconosciamo in ciò la limitata flessibilità delle tecnologie impiegate per tale gestione. Solo a mo' di esempio, un libro (inteso naturalmente nel suo senso tradizionale di volume cartaceo) non è in grado di portare informazione di tipo sonoro, e a questo scopo può essere quindi complementato con un'audiocassetta, che a sua volta non può portare informazione di tipo grafico.

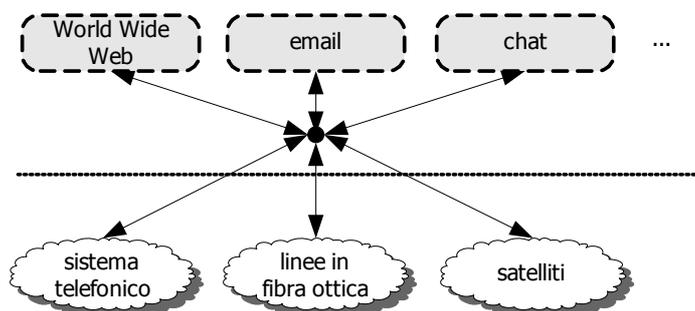
Esiste poi un secondo, e più sottile, motivo di criticità in questo genere di processi di corrispondenza, relativo non più al *tipo di informazione* portato (testo, immagini, suono, ...), ma alle *condizioni* che le infrastrutture impiegate pongono *all'usufruità dell'informazione*. Solo per citare qualche esempio sia di infrastruttura sia di condizioni di usufruità, un libro viene usato in modo unidirezionale (dall'autore al lettore), asincrono (prima l'autore scrive e completa l'opera, poi il lettore legge) e con una distribuzione da uno a molti (dall'autore ai lettori); il sistema televisivo è anch'esso unidirezionale e basato su una distribuzione da uno a molti, ma è sincrono (i programmi televisivi sono accessibili nel momento in cui vengono trasmessi; a questo proposito è interessante considerare che l'introduzione del videoregistratore, come quella della segreteria telefonica per il sistema telefonico, ha introdotto l'opzione di asincronizzare un'infrastruttura originariamente solo sincrona: d'altra parte, videoregistratore e segreteria telefonica sono appunto parti complementari, che devono essere aggiunte all'infrastruttura iniziale per ottenere tale incremento di flessibilità).

Dall'impiego di processi di corrispondenza digitali si ottiene il fondamentale beneficio di poter rendere l'informazione portata largamente indipendente dalle caratteristiche del supporto

usato. Ciò facilita l'interscambiabilità dei supporti, da cui consegue in particolare la piena replicabilità dell'informazione, ma soprattutto, e complementariamente, la possibilità di *integrare* su uno stesso supporto la gestione di informazione ottenuta mediante processi di corrispondenza significativamente diversi l'uno dall'altro, sia per tipo di informazione portata sia per condizioni di usufruibilità poste. L'esempio che con maggior evidenza mette oggi in luce questa flessibilità inerente è plausibilmente quello di Internet. Il suo essere digitale, lo (oppure la?) rende capace di offrire servizi diversi anche su una stessa infrastruttura fisica:



e in effetti di offrire tali servizi anche su infrastrutture fisiche diverse:



creando quindi un effetto, come si dice abitualmente, di *trasparenza* dell'infrastruttura impiegata per la distribuzione dei servizi, per cui gli stessi servizi vengono resi accessibili *a prescindere* dallo specifico canale di trasmissione (se in questo discorso concettuale introducessimo il fattore quantitativo, prestazioni e co-

sti, scopriremmo naturalmente la sola parziale trasparenza dell'infrastruttura fisica: in termini appunto di prestazioni e costi non è la stessa cosa accedere ai servizi di Internet via modem o con una connessione diretta in fibra ottica. Ma questo fattore di differenziazione non intacca la sostanziale universalità dell'architettura). Questo fa sì che di Internet non si possa asserire se sia unidirezionale o bidirezionale, sincrono o asincrono, basato su una distribuzione da uno a molti o da uno a uno, ... E ciò perché l'infrastruttura di Internet *rende contemporaneamente disponibili* tutte queste modalità di impiego.

Tale flessibilità rende spesso complesso categorizzare i vari servizi di Internet rispetto alle condizioni di usufruibilità dell'informazione: la posta elettronica, per esempio, è «originariamente» basata su una distribuzione uno a uno, ma sistemi come le liste di distribuzione (il cui uso deleterio genera quel fenomeno di moltiplicazione di messaggi non richiesti noto come *spamming*) ne rendono possibile, senza che l'utente debba modificare in alcun modo la sua infrastruttura di accesso, un impiego per la distribuzione uno a molti. Per fare l'esempio di una caratteristica ancora diversa da quelle finora citate, World Wide Web è «originariamente» basato su una modalità di distribuzione di tipo *client-pull* (è l'utente che richiede il servizio, navigando tra i vari siti), ma è parimenti configurabile per un accesso di tipo *server-push*, come è il caso dei servizi (i cosiddetti «canali») che, previa un'iscrizione, inviano automaticamente all'utente pagine dai contenuti aggiornati.

La più completa indipendenza dell'informazione portata dal supporto impiegato si ottiene poi accoppiando l'opzione di adottare processi di corrispondenza digitali con la scelta di strutturare tali processi come successioni di sottoprocessi. Proponiamo anche a questo proposito un esempio. Perché due entità, supponiamo per ora che siano due esseri umani, possano comunicare (una peculiare modalità di trattamento dell'informazione), devono essere soddisfatte varie condizioni. Schematicamente (e, ovviamente, assai semplificando la complessità effettiva del processo), «per livelli»:

- *livello 1*: i due devono avere un linguaggio e competenze comuni rispetto all'oggetto della comunicazione (non posso

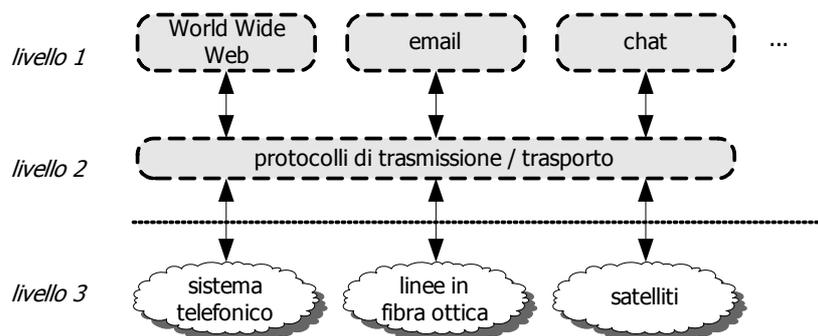
parlare, sperando di essere compreso, di fisica quantistica a un bambino);

- *livello 2*: i due devono avere una lingua comune per esprimere l'oggetto della comunicazione (non posso parlare, sperando di essere capito, in cinese a chi non conosca questa lingua);
- *livello 3*: i due devono avere accesso a una stessa infrastruttura fisica che funga da supporto per la comunicazione, e che renda l'informazione oggetto della comunicazione identificabile da entrambi (non posso parlare, sperando di essere sentito, a un sordo o comunque in condizioni di elevata rumorosità dell'ambiente circostante).

Ognuna di queste condizioni è necessaria per il buon esito della comunicazione, e ognuna richiede la successiva come precondizione. Fondamentale è poi che ogni livello, corrispondente a un sottoprocesso di corrispondenza, risulta almeno parzialmente indipendente dagli altri nelle sue modalità di soddisfacimento. Se, per esempio, due individui che vogliono comunicare già soddisfano le condizioni relative ai primi due livelli (entrambi conoscono la meccanica quantistica e parlano in italiano) ma non al terzo (per qualche ragione non riescono a sentirsi), i due potranno concordare di affidarsi a un'entità di intermediazione «di terzo livello» (una lettera? il telefono? un messaggero dotato di buona memoria e in grado di riferire i discorsi dell'uno all'altro e che al limite potrebbe perfino ignorare la lingua che i due usano?), senza con ciò dover modificare le loro competenze relative alle due condizioni già soddisfatte. Nel caso di processi di corrispondenza realizzati in una sola fase, questa autonomia funzionale tra livelli non viene sfruttata, e quindi, in presenza di una difficoltà di comunicazione relativa a uno qualsiasi dei livelli, l'intero processo di corrispondenza deve essere rivisto e modificato.

Sostanzialmente diversa è la situazione dei processi di corrispondenza realizzati in più fasi, cioè appunto «a livelli». In tal caso la modularità funzionale consente contemporaneamente la *specializzazione* e l'*interscambiabilità* degli strumenti tecnologici che realizzano i vari sottoprocessi di corrispondenza. Caso pa-

radigmatico di ciò è proprio Internet, la cui struttura almeno a un primo livello di approssimazione è presentabile così:



Senza entrare in dettagli, che potrebbero tra l'altro portare a individuare un numero maggiore di livelli in questa struttura (è noto, per esempio, a questo proposito il «modello di riferimento» *Open System Interconnection*, OSI, proposto dalla *International Standardization Organization*, ISO, che organizza l'intero processo di corrispondenza tra il «livello applicativo» e il «livello fisico» in una successione di 7 livelli), notiamo il ruolo cruciale di quello che qui abbiamo designato come livello 2, costituito dall'insieme delle regole convenzionalmente concordate (perciò «protocolli», non solo in linguaggio diplomatico dunque) per impiegare i vari mezzi fisici come canali di trasmissione per i vari servizi applicativi che Internet mette a disposizione dell'utente. Tale livello 2 è la vera e propria *lingua franca* di Internet (una sorta di esperanto tecnologico realizzato: si chiama TCP/IP), che ogni dispositivo tecnologico deve «parlare» per «essere in» Internet.

La diffusione e la conseguente standardizzazione *de facto* di questo livello sta generando il fenomeno che tutti abbiamo sotto gli occhi: il progressivo raggiungimento dell'indipendenza dal supporto fisico per le operazioni di trattamento dell'informazione *Internet-based*.

Otteniamo da ciò un insegnamento che possiamo formulare come un *principio*:

**dato il fatto che per gestire informazione  
si gestisce materia/energia,  
nelle situazioni in cui la finalità  
è di gestire informazione (e non materia/energia),  
«meno materia/energia si gestisce» meglio è.**

Un secondo insegnamento riguarda una *condizione* di operatività di questo principio:

**per gestire informazione «gestendo poca materia/energia»  
è opportuno adottare processi di corrispondenza  
che mantengano la maggiore indipendenza possibile  
tra la materia/energia usata come supporto  
e l'informazione portata.**

Possiamo esemplificare ulteriormente questa condizione di indipendenza tra materia/energia e informazione con una breve considerazione su ciò che distingue le varie tipologie delle opere d'arte dal punto di vista della loro riproducibilità (un interessante tema in sottofondo a questo discorso riguarda la natura delle opere d'arte in quanto entità parte del mondo della materia/energia e/o del mondo dell'informazione). È un dato di fatto che, per le motivazioni tipiche all'accesso a un'opera d'arte, questa può essere di fatto irriproducibile (citiamo: una cattedrale), riproducibile ma con una essenziale distinzione tra originale e copia (un affresco), oppure inerentemente riproducibile (un romanzo). Ciò che è diverso in questi tre casi è il «contenuto di materia/energia» presente nell'opera, e quindi la relazione che è posta, proprio nel momento della creazione dell'opera, tra il supporto di materia/energia e la *forma* (in-forma-zione...) che l'artista imprime su un tale supporto. Nel caso della cattedrale, questa relazione è talmente stretta che si può ben dire che per realizzare l'opera l'architetto deve «costruirne il supporto». All'estremo opposto, dal punto di vista dello scrittore il supporto fisico costituito da carta e inchiostro è un puro strumento di lavoro (e lo è a maggior ragione oggi, se egli sceglie di impiegare un *word processor*...), e il lettore di un romanzo non sente certo sminuito il valore della sua esperienza perché non accede al romanzo mediante la versione autografa dell'autore (che poi,

nel caso di uso di un *word processor*, non esiste del tutto). Dunque, quanto più è stretta questa relazione, quanto più diventa un «legame», tanto meno l'opera è riproducibile, e questo per una ragione peculiare: l'informazione si può copiare, la materia/energia no.

Possiamo complementare il *principio* e la *condizione* proposti sopra con una loro *conseguenza*, che fornisce un criterio di efficienza per la progettazione dei sistemi di accesso a informazione:

**dato il fatto che anche gli esseri umani  
sono anche entità del mondo della materia/energia,  
per rendere accessibile informazione a esseri umani  
è opportuno minimizzare  
i costi di spostamento della materia/energia  
considerati tenendo conto dei costi di spostamento  
sia degli esseri umani sia del supporto per l'informazione.**

Nell'interpretazione delle applicazioni storiche di questa conseguenza del principio, Internet appare come l'ultima delle numerose soluzioni tecnologiche che sono state via via adottate. Lapidariamente, potremmo intitolare questo percorso *dalle incisioni rupestri a Internet*: le prime offrono un'informazione con una tale «densità di materia/energia» (non sarebbe improprio a questo proposito parlare di supporti pesanti come montagne!) da imporre che siano gli esseri umani a muoversi per accedere all'informazione. Internet, che in questo non è diverso da tutti gli attuali sistemi di telecomunicazioni, dal telefono alla televisione, consente agli esseri umani di non muoversi, e sposta l'informazione loro incontro impiegando supporti la cui «densità di materia/energia» si riduce progressivamente, fino alla densità praticamente nulla di un bit<sub>m</sub> portato su fibra ottica.

È paradigmatica di questo cambiamento la vicenda degli ipertesti, entità informazionali caratterizzate meta-informazionalmente per la loro struttura non lineare. Le opere ipertestuali non sono certo una novità: sono tali, per esempio, le enciclopedie ma anche tutti i documenti che contengono indici o rimandi interni. La ragione per cui oggi si parla con tale enfasi di ipertesti riguarda quindi non il livello puramente informa-

zionale ma proprio le nuove possibilità di relazione che a proposito della gestione di ipertesti si possono stabilire tra il livello informazionale e quello fisico. Di fronte alla struttura reticolare complessa di un ipertesto, tradizionalmente è l'essere umano a doversi muovere per «seguire i collegamenti» definiti tra le parti del documento (si pensi al caso di un ipertesto organizzato fisicamente su più volumi, come è il caso di molte enciclopedie, in cui per seguire un rimando «vedi anche...» occorre recuperare un nuovo volume e aprirlo alla pagina giusta). Un sistema software per la gestione di ipertesti è in grado di compiere questa operazione in modo automatico e trasparente all'utente, con un'efficienza tale da indurre all'ipotesi che il sogno della biblioteca universale possa diventare presto realtà, nella forma di una qualche evoluzione dell'attuale World Wide Web. Ciò che è cambiato non sono dunque gli ipertesti, ma i sistemi per la loro gestione. E appropriatamente questo cambiamento è stato giudicato uno *spostamento di punto di vista* analogo a quello prodotto dalla rivoluzione copernicana. Anche allora quello che cambiò non fu effettivamente il sistema osservato, ma il modo con cui esso veniva osservato. Non è da sottovalutare comunque una essenziale differenza tra la rivoluzione astronomica copernicana e la rivoluzione dei sistemi per la gestione dell'informazione: la prima generò dei cambiamenti nel quadro *scientifico* dell'epoca, ma ebbe un impatto molto limitato sulla quotidianità (in fondo, tutti ancor oggi operativamente pensiamo in termini geocentrici: «il sole sta tramontando»). La rivoluzione *tecnologica* del digitale e multimediale sta invece modificando in modo irreversibile il nostro modo di rendere accessibile, usare e perfino pensare l'informazione nella vita quotidiana.



## QUALCHE RIFERIMENTO BIBLIOGRAFICO

Gli argomenti qui trattati sono numerosi e diversificati; una bibliografia che ambisse a fornire un quadro ragionevolmente completo e aggiornato della letteratura al riguardo dovrebbe essere inevitabilmente assai estesa.

Piuttosto, mi sembra più congruente con lo spirito di questo lavoro la scelta, assolutamente soggettiva e inevitabilmente parziale, di proporre qualche riferimento a testi introduttivi, o comunque «che fanno pensare», su alcuni dei temi intorno ai quali il nostro percorso si è sviluppato.

Alle origini dell'attuale interesse per il digitale e il multimediale, e più in generale per le relazioni tra mondo fisico e mondo dell'informazione, sta non soltanto uno straordinario sviluppo tecnologico ma anche una solida concettualizzazione, risultato, tra l'altro, del lavoro confluyente di tre discipline nate pressoché simultaneamente intorno alla metà del ventesimo secolo: la teoria dei sistemi, la cibernetica e la teoria dell'informazione.

Un'introduzione al punto di vista sistemico si trova in:

L. Von Bertalanffy, *Teoria generale dei sistemi – Fondamenti, sviluppo, applicazioni*, Mondadori, Milano, 1983 (traduzione di *General system theory - Foundations, development, applications*, Braziller, New York, 1969)

un'antologia di scritti di colui che è generalmente considerato il principale ispiratore dei primi sviluppi della teoria dei sistemi. Ricco di esempi e basato su un apparato formale assai accessibile e comunque introdotto con grande attenzione didattica è:

W.R. Ashby, *Introduzione alla cibernetica*, Einaudi, Torino, 1971<sup>2</sup> (traduzione di *An introduction to cybernetics*, Chapman & Hall, London, 1956)

che propone un percorso introduttivo alla cibernetica.

L'approccio alla teoria dell'informazione rimane non facile, a causa delle sue basi matematiche. Un testo che assume il punto di vista informazionale, presentandolo in una prospettiva più logica che appunto matematica, e, in modo stimolante, cerca di estenderlo oltre il livello esclusivamente sintattico è:

K. Devlin, *Logic and information*, Cambridge University Press, Cambridge, 1991.

Vari temi qui introdotti trovano un'immediata applicazione nel campo delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione; un testo didattico che adotta questa prospettiva applicativa è:

D. Sciuto, G. Buonanno, W. Fornaciari, L. Mari, *Introduzione ai sistemi informatici*, McGraw-Hill, Milano, 2002<sup>2</sup>,

Specificamente orientato al problema e alle tecniche della formalizzazione di dati e funzioni è:

D. Harel, *Algorithmics – The spirit of computing*, Addison-Wesley, Reading, 1992<sup>2</sup>

Per esplorare il tema generale della computazione si può seguire un percorso storico, con un'antologia di scritti dei «padri fondatori» (Turing, Von Neumann, Shannon, ecc.):

V. Somenzi, R. Cordeschi (a cura di), *La filosofia degli automi – Origini dell'intelligenza artificiale*, Bollati Boringhieri, Torino, 1994

ma ci si può anche lasciar immergere nelle magie autoreferenziali e ricorsive di:

D.R. Hofstadter, *Gödel, Escher, Bach: un'Eterna Ghirlanda Brillante*, Adelphi, Milano, 1984 (traduzione di *Gödel, Escher, Bach: an Eternal Golden Braid*, Basic Books, New York, 1979)

avvertiti che l'autore prende chiaramente parte a favore del «punto di vista dell'intelligenza artificiale».

Una visione diversa, e tra l'altro anche assai attenta alla questione delle relazioni tra mondo fisico e mondo dell'informazione, si trova in:

R. Penrose, *La mente nuova dell'imperatore*, Rizzoli, Milano, 1992 (traduzione di *The emperor's new mind – Concerning computers, minds, and the laws of physics*, Penguin Books, New York, 1991)

che, come dichiara lo stesso sottotitolo, affronta lo stesso tema che Popper chiama «dei tre mondi» (curiosamente: senza alcun

riferimento a opere del suddetto filosofo) e che ha introdotto nel primo volume, «Materia, coscienza e cultura» di:

K.R. Popper, J.C. Eccles, *L'io e il suo cervello*, Armando, Roma, 1981 (traduzione di *The self and its brain – An argument for interactionism*, Springer-Verlag, Berlin, 1977)

e ha ripreso, specificandolo, nel più recente:

K.R. Popper, *La conoscenza e il problema corpo-mente*, Il Mulino, Bologna, 1996 (traduzione di *Knowledge and the body-mind problem – In defence of interaction*, Routledge, London, 1994).

Lo stesso tema è oggetto della stimolante antologia di racconti:

D.R. Hofstadter, D.C. Dennet (a cura di), *L'io della mente - Fantasie sul sé e sull'anima*, Adelphi, Milano, 1985 (traduzione di *The mind's I – Fantasies and reflections on self and soul*, Basic Books, New York, 1985).

Ancora trasversale a tutto questo lavoro è il tema delle relazioni tra «cose» ed entità di informazione, di cui si tratta in:

G. Toraldo di Francia, *Le cose e i loro nomi*, Laterza, Roma, 1986

e anche, con un'originale impostazione che sintetizza contributi di storia della scienza, filosofia della scienza e filosofia del linguaggio, in:

I. Hacking, *Conoscere e sperimentare*, Laterza, Roma, 1987 (traduzione di *Representing and intervening*, Cambridge University Press, Cambridge, 1983).

Infine, mi sia concesso includere in questo breve elenco quella straordinaria raccolta di racconti che è:

J.L. Borges, *Finzioni*, Einaudi, Torino, 1955 (traduzione di *Ficciones*, Sur, Buenos Aires, 1935-1944)

una fonte inesauribile di suggestioni e immagini fantastiche a proposito del nostro tema.