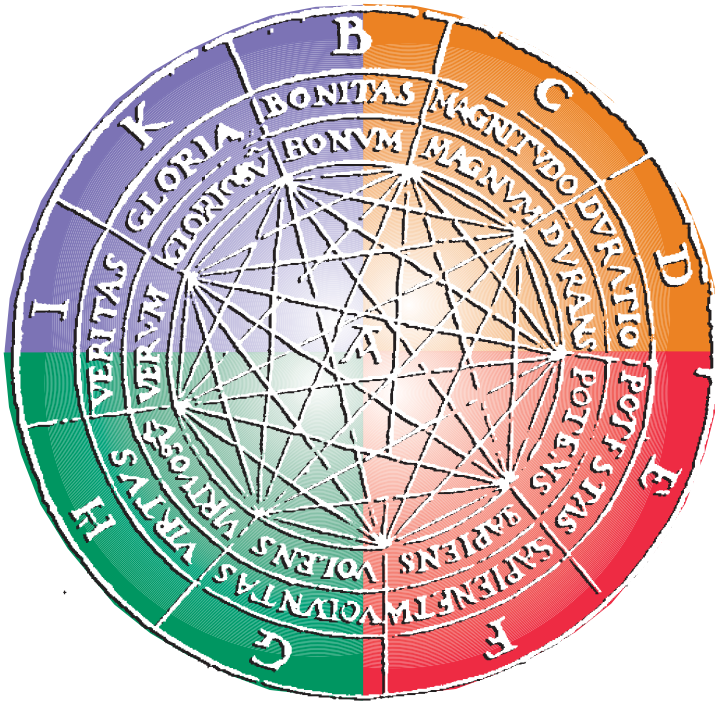


# BITS, ÀTOMS I MÀQUINES VIRTUALS

**Jordi Vitrià i Marca**  
Departament de Matemàtica Aplicada i Anàlisi



Lliçó inaugural del curs acadèmic 2009-2010  
Facultat de Matemàtiques

# BITS, ÀTOMS I MÀQUINES VIRTUALS

**Jordi Vitrià i Marca**

Departament de Matemàtica Aplicada i Anàlisi

Lliçó inaugural del curs acadèmic 2009-2010

Facultat de Matemàtiques

Barcelona, 30 de setembre de 2009



UNIVERSITAT DE BARCELONA

U

B

# Bits, àtoms i màquines virtuals

Jordi Vitrià i Marca  
Departament de Matemàtica Aplicada i Anàlisi  
Facultat de Matemàtiques  
Universitat de Barcelona

## Resum

Tot i l'aparent maduresa, la informàtica és encara una disciplina científica que es redefineix periòdicament i que mantindrà durant molt de temps una sèrie de preguntes sense resposta. Aquesta lliçó fa un repàs actualitzat dels objectius finals de la recerca en un dels camps de la informàtica més actuals, la intel·ligència artificial, tot reflexionant sobre el que s'ha aconseguit i sobre quins són els reptes més importants de futur.

## 1 Introducció

Ningú pot negar que en els darrers anys la informàtica ha estat percebuda socialment com un dels motors tecnològics en molts sectors industrials i fins i tot com un factor decisiu en els canvis de comportament social a escala mundial. Aquest èxit aparent, però, ha originat simultàniament una sèrie de contradiccions que en els darrers temps comencen a ser preocupants des d'un punt de vista acadèmic.

Una de les contradiccions més importants és la que es genera al voltant de les vocacions dels joves universitaris i dels seus perfils: com pot ser que les inscripcions a la carrera d'informàtica baixin any rere any?, per què la informàtica atrau un nombre tan reduït de dones?

Aquest és un fenomen generalitzat a les societats desenvolupades (i que encara no és perceptible a les societats en desenvolupament), i per tant s'han creat diverses iniciatives per buscar-hi respostes. En el marc d'aquestes iniciatives, i durant els darrers cursos, les universitats americanes de SUNY Buffalo i Rice han pensat en les possibles respostes a aquestes preguntes [1], i algunes de les conclusions són interessants ja que segurament són rellevants per al nostre entorn immediat:

- La informàtica és percebuda, a diferència d'altres enginyeries, com una disciplina **utilitària**, sense valor afegit ni en l'àmbit intel·lectual ni en el professional: *si tens bones idees, sempre podràs contractar un informàtic perquè les implementi!*
- La informàtica és percebuda com una disciplina sense **dimensió social**. Un dels motius pels quals l'interès actual dels estudiants per la informàtica ha baixat és perquè la disciplina no ha sabut comunicar el seu «missatge social» segons el qual la informàtica ofereix un marc intel·lectual privilegiat (i un conjunt absolutament inigualable d'eines!) per resoldre problemes personals (problemes «socials») i de tota la societat (problemes «Socials»).

Des de l'àmbit acadèmic hi ha un interès evident a revertir aquesta situació, però la gran pregunta és: com? Evidentment no hi ha una recepta única, però segur que una part de la resposta és valoritzar i divulgar l'ànima motora que ha tingut sempre la informàtica: la recerca.

Aquesta lliçó intenta aportar, des d'un punt de vista molt personal, elements per destacar l'actualitat i el valor afegit que la recerca en informàtica pot aportar a escala intel·lectual i també la seva connexió profunda amb la comprensió de nosaltres mateixos, un fet d'importància social indubtable.

## 2 Una ciència a la recerca de nom, o és al revés?

A diferència d'altres disciplines científiques més consolidades, quan es pregunta a un investigador en informàtica sobre el sentit últim de la seva recerca, sovint hi ha un dubte existencial sobre quina resposta ha de donar, i acaba parlant de motius utilitaris (per fer ordinadors més petits, més ràpids, més usables, etc.). Però aquesta resposta és evidentment incompleta, ja que els motius utilitaris no poden constituir l'ànima de cap ciència.

Per entendre l'origen d'aquest fenomen és interessant observar que la informàtica té encara un problema de definició, començant pel nom! Observeu dos detalls: (i) la multiplicitat de noms (*informàtica*, *computació*, etc.), i (ii) el fet que deu ser l'única disciplina científica el nom anglès de la qual, *computer science*, conté la paraula *ciència*. Aquest fet és una bona mostra d'una problemàtica de fons: la dificultat que hi ha hagut fins ara per definir l'objecte d'estudi.

En l'imaginari col·lectiu, el terme *computació* s'associa principalment a la manipulació numèrica, mentre que el terme *informàtica* és remissiu de paraules estranyes i acrònims inintel·ligibles.

La *computació* (o la *informàtica*), però, no hauria de ser un terme necessàriament lligat a les xifres, a les paraules rares o les sintaxis exòtiques de les comandes. Tothom té intuïtivament clar què vol dir *computar*: quan calculem mentalment el preu final d'un article amb descompte estem computant, quan fem el sudoku del diari estem computant (amb l'ajuda d'un llapis i paper) i quan juguem al Tetris també tenim clar que l'ordinador està computant. Fins i tot alguns físics ens diuen que l'univers quàntic és una gran màquina de computació, i que la matèria i l'energia són només abstraccions construïdes d'informació [2]. Què hi ha en comú en totes aquestes accions?

Comencem analitzant una de les formes de computació més simples i que segurament constitueix l'analogia més estesa sobre el concepte de *computació*: l'aritmètica. Quan sumem mentalment dos nombres, el resultat és un altre nombre, i per tant podríem veure aquest cas com un cas de «pregunta-resposta»: computar podria consistir a associar una sortida (correcta) a una determinada entrada (cada una de les quals té una resposta correcta).<sup>1</sup>

Aquesta operació es pot fer mentalment, aplicant associacions memoritzades, per a nombres petits, però quan la magnitud dels nombres implica unes quantes xifres s'ha de fer amb l'ajuda de paper i llapis, seguint unes **regles** fixades. La utilització del paper introdueix, però, una variant important: mentre que en el primer cas els nombres es representaven com un conjunt de sons, en el segon cas hem usat símbols visuals. Però en els dos casos podem arribar a la resposta correcta, independentment de la **representació** usada.

És important també assenyalar que, més enllà de l'especificació de la relació entre la pregunta i la resposta, hi ha un element crític: les regles de producció de la resposta, que podem anomenar *algorisme*, *procediment*, *rutina*, etc. La diferència entre funció i algorisme és que mentre que la primera només especifica *quines* són les sortides, en el segon cas s'especifica *com* calcular-les. Aquest aspecte, indestruïble del concepte de *computació*, ens porta a una primera aproximació a la definició d'*informàtica*: l'estudi del coneixement algorímic, o en altres paraules, com descriure algorismes, com construir-los i com comparar els que computen la mateixa funció.

En molts entorns aquesta és ja una definició satisfactòria, però fins i tot ens queda curta ben aviat si pensem una mica més enllà de l'aritmètica o del simple processament de dades. En molts casos, l'interès principal d'un algorisme no és l'obtenció d'una sortida correcta en funció de l'entrada,

---

<sup>1</sup>És fàcil adonar-se que ens estem referint a allò que els matemàtics anomenen *funció*.

sinó el *comportament* durant l'execució. El millor exemple d'aquest cas el constitueix un joc d'ordinador.

### 3 Informació, representació i algorismes

Tal com hem comentat anteriorment, les preguntes i les respostes estan sempre codificades en una determinada representació (sons, símbols manuscrits, etc.), i la forma concreta d'aquesta representació té una influència molt gran en l'algorisme: només cal comparar els algorismes per calcular una multiplicació en notació decimal i en notació romana per adonar-se d'aquest fet!

Els ordinadors actuals s'han construït amb dues propietats universals al voltant del concepte de *representació*: la **programabilitat** i la **generalitat**. En el primer cas, la capacitat que una mateixa màquina pugui executar diferents algorismes és un requeriment essencial. En el segon cas, ho és la capacitat de manipular diferents representacions (caràcters, nombres, sons, imatges, etc.). Aquestes dues propietats, junt amb els requeriments imposats per la tecnologia electrònica, han fet que la informàtica prengui com a forma de representació universal el **sistema binari**.

Des d'aquest punt de vista podríem pensar que això reforça la visió «numèrica» de la computació, però això només és veritat superficialment. De fet, és més encertat pensar en el sistema binari com un alfabet, molt simple, que té la capacitat de generalitat i que ens fa molt fàcil la implementació del concepte de *programabilitat*. Des d'aquest punt de vista, un ordinador és un aparell caracteritzat per les propietats següents:

- L'ús d'un sistema de representació universal basat en cadenes de bits.
- L'existència d'un conjunt de regles de manipulació de cadenes de bits implementades físicament.
- La capacitat d'emmagatzemar dades i algorismes a la memòria en forma de cadenes de bits.
- La capacitat d'interpretar segons unes regles predefinides els algorismes i produir així canvis en la memòria.
- La capacitat de llegir dades de l'entorn a partir de sensors, i de modificar-lo a través de transductors.

## 4 Sobre la universalitat

El concepte d'*universalitat* ha constituït des del principi un dels eixos principals de la recerca en informàtica. Les primeres màquines que podien simular altres màquines les va pensar el matemàtic britànic Alan Turing [4], i a causa d'això es coneixen com a *màquines de Turing*. Una d'aquestes màquines, la màquina universal de Turing, és un màquina programable (no totes ho eren!) que pot llegir la representació de qualsevol altra màquina de Turing i simular-la.

La importància de les màquines de Turing és que poden simular qualsevol ordinador que hàgim imaginat, i per tant qualsevol ordinador que pugui simular una màquina de Turing universal pot computar qualsevol concepte computable que hàgim imaginat.<sup>2</sup> Evidentment, els ordinadors que construïm poden simular la màquina de Turing i per això diem que són universals.

Una conseqüència d'això és que els dissenyadors d'ordinadors poden fer abstracció del mateix ús de l'ordinador, sempre que les comandes bàsiques facin que aquell ordinador pugui simular una màquina de Turing universal.

## 5 Computació i intel·ligència

Fins aquí hem vist alguns aspectes fonamentals de la informàtica que, tot i ser interessants i necessaris, encara no s'han enunciat d'una manera que en faci evident l'aportació a la comprensió del món que ens envolta, qüestió cabdal per a qualsevol ciència.

Per tant, més enllà de les qüestions bàsiques relacionades amb el que hem comentat (què és computable?, quins són els límits algorísmics?,  $P = NP?$ ), ens podem continuar preguntant quines són les grans qüestions que vol respondre la informàtica.

En els darrers temps, la resposta s'ha centrat en un conjunt reduït de qüestions [3]:

- Què és la informació?
- Es poden dissenyar sistemes complexos d'una manera simple?
- Què és la intel·ligència?

---

<sup>2</sup>Avui en dia s'assumeix, tot i que només és una hipòtesi, la hipòtesi de Church-Turing, que qualsevol funció computable es pot computar amb una màquina de Turing.

Per falta de temps no podem entrar en detall en els tres conceptes, però val la pena aturar-se en un: la cerca de la intel·ligència. La informàtica no té, òbviament, l'exclusiva d'aquesta pregunta, que és compartida amb moltes altres disciplines, però sí la capacitat d'atacar el problema des del punt de vista sintètic i no analític (com podria ser el cas de la neurociència). Però per entendre el problema, les respostes parcials que tenim fins ara i les tasques encara pendents, cal tirar una mica enrere...

## 5.1 Sobre un cert tipus de complexitat i la incertesa que genera

La creació del món segons l'Antic Testament<sup>3</sup> és una descripció familiar per a una part important de la humanitat, que per als nostres objectius té unes característiques interessants: el mite cristià del Gènesi assumeix, com a pas previ a l'existència humana i a la seva intel·ligència, l'existència necessària d'un cert entorn que es materialitza en els conceptes de *món* i *llum*. Seguint el model del Gènesi, ens podríem preguntar, quin és el món i la llum que necessitem per a l'existència de sistemes intel·ligents o cognitius (artificials)? La resposta no és gaire diferent a la donada a l'Antic Testament: un **entorn complex** —per exemple, el món real— i uns fenòmens físics que ens permetin llegir l'estat del món —per exemple, la llum.

Reconeguem primer una cosa quasi evident: el món on vivim és un entorn complex. Aquesta frase segur que tindrà pocs detractors entre els oients, però cal analitzar-ne el sentit en detall abans de continuar, sobretot el sentit de la paraula *complexitat*.

El món complex que ens interessa és un món *parcialment accessible*. Això vol dir que l'observador no pot accedir a tots aquells aspectes del món que li interessarien potencialment i per tant es veu obligat a prendre decisions amb informació parcial. El món se'ns descobreix en una part petita i es guarda per a ell mateix la majoria de la seva complexitat natural. Hi ha fenòmens físics que ens permeten llegir el món (la llum, les ones de pressió que produeixen els sons, etc.), però sempre de manera molt parcial i força imprecisa. L'observador està sempre parcialment aïllat de la realitat física del món. El món real sempre serà per tant una realitat més complexa que

---

<sup>3</sup>«1 Al principi, Déu va crear el cel i la terra. 2 La terra era caòtica i desolada, les tenebres cobrien la superfície de l'oceà, i l'esperit de Déu planava sobre les aigües. 3 Déu digué: —Que hi hagi llum. I hi hagué llum. 4 Déu veié que la llum era bona, i separà la llum de les tenebres. 5 Déu va donar a la llum el nom de dia, i a les tenebres, el de nit. Hi hagué un vespre i un matí, i fou el primer dia.» *Gènesi 1, 1-5*.



la realitat observada. I com n'hi podem dir a la diferència entre el món real i el món observat? Doncs *incertesa* [6].

El món és *no determinista*. Quan l'observador pren una decisió i actua d'alguna manera, mai pot estar segur del resultat de la seva acció. Quan decidim posar un peu davant de l'altre i començar a caminar podem rrelliscar i no arribar al nostre objectiu. Quan decidim agafar un cotxe per anar a treballar no podem saber si arribarem a l'hora o si per culpa d'un problema mecànic arribarem tres hores tard. L'observador resta a la mercè de fenòmens no controlables que poden fer variar de moltes maneres el resultat de la seva acció.

El món té un fort component *dinàmic*. Al món hi ha molts esdeveniments, alguns causats per l'acció de l'observador, però la majoria independents d'ell. I l'observador es veu obligat a controlar el món si vol que les seves accions assoleixin l'objectiu desitjat. Ha d'estar atent a l'evolució del món per adaptar-s'hi i no deixar-se sorprendre.

Podríem continuar parlant de les característiques del món que són rellevants des del punt de vista de l'observador, però de moment ens aturarem. De fet, ja en tenim prou per posar-nos d'acord que qualsevol món, el físic o d'altres que podem imaginar o construir, que presenti aquestes característiques és complex!

## 5.2 Sobre l'observador i la seva relació amb el món

Els objectes inerts són al món però no l'habiten. Ni el pateixen. Ni el frueixen. Només hi són.

No és fins a l'aparició de la vida que en el nostre món hi apareixen uns objectes especials que fan alguna cosa més que ser-hi. I és en aquest tipus d'objectes que apareix també per primer cop un sistema cognitiu (natural). Un sistema al qual s'arriba per mecanismes evolutius i que ofereix a l'ésser viu una sèrie d'avantatges per sobreviure i reproduir-se. Ha nascut el primer observador del món!

De la mateixa manera que ens hem preguntat quines eren les condicions necessàries que havia de complir un entorn per merèixer que un sistema cognitiu l'habiti, ens podem preguntar també quines són les condicions necessàries perquè un observador pugui habitar el món i s'estableixi la relació necessària sobre la qual es definirà el sistema cognitiu.

Primer de tot, l'observador ha de ser *actiu*, cosa que no compleixen tots els éssers vius! Ha de poder actuar sobre el món. Ha de poder canviar l'estat del món, i per fer-ho ha de tenir mecanismes d'acció sobre el món. Si ens fixem en els humans, que evidentment són sistemes cognitius (naturals),

la nostra capacitat d'acció és molt variada: podem desplaçar-nos sobre el món físic amb el moviment de les cames, podem assimilar altres objectes del món a través de mecanismes fisiològics complexos, podem manipular altres objectes amb l'ajut de les mans, podem comunicar-nos amb altres sistemes cognitius mitjançant la parla o l'escriptura, etc.

I l'activitat, per a què? Doncs per assolir algun tipus d'*objectiu* o de *desig*. L'observador actiu ha de tenir necessàriament una sèrie d'objectius i de necessitats que només pot assolir mitjançant les accions. Per tant l'observador ha d'estar motivat, ha de tenir un conjunt d'objectius —complexos, de molts tipus i en molts àmbits— que el moguin a actuar d'una determinada manera i no d'una altra. Si no, per què s'ha d'actuar?

En el cas dels animals, a la base de la piràmide dels objectius i les necessitats hi trobem la supervivència i l'instint de reproducció. En el cas d'éssers artificials, la piràmide podria tenir una base diferent. Potser hauríem de posar a la base la utilitat per als éssers vius? Aquesta és una pregunta amb resposta complexa, amb conseqüències filosòfiques profundes, que generaria una diferència essencial profunda entre éssers naturals i artificials: la utilitat. Mentre que en el cas natural no es pot aplicar aquest concepte, del cas artificial no se'n pot parlar sense aquest concepte! [7]

Abans hem comentat que a causa del component dinàmic del món, l'observador ha de poder llegir el món, l'estructura que el caracteritza i els esdeveniments que hi passen. D'això en diem *percepció*. Per tant, l'agent ha d'estar dotat d'algun tipus de mecanisme que li permeti aquesta lectura de manera adequada a les característiques del món. Tornant al cas dels humans, la percepció del món exterior es fa amb diferents sistemes: la lectura, descodificació i interpretació de la informació que porta la llum, mitjançant el sistema visual; la lectura, descodificació i interpretació de la informació que porten les ones de pressió de l'aire, mitjançant el sistema auditiu; la mesura de les petites irregularitats geomètriques de les superfícies dels objectes, mitjançant el tacte; la mesura de la presència de certes partícules o compostos químics en els objectes, mitjançant l'olfacte o el gust. I podríem imaginar altres formes de percepció, sempre lligades a alguna forma d'energia, que ens permetessin la lectura del món físic.

Un observador motivat, actiu i amb capacitat de percepció situat en un món complex constitueix la base de qualsevol sistema cognitiu. Tècnicament, d'aquest tipus d'entitat se'n diu un *agent*. L'existència de l'agent és la base necessària, però no suficient, per parlar de sistema cognitiu. Què ens falta? Doncs que tingui èxit en la recerca dels objectius!, i això no és simple. Cal que l'agent s'articuli internament perquè el que llegeix del món resulti en una sèrie d'accions que l'acostin a l'objectiu, a vegades de maneres no evidents

ni directes, que li permetin una tàctica i una estratègia que el conduixin a l'èxit existencial. Aquesta arquitectura, de naturalesa bàsicament informacional, l'anomenarem *sistema cognitiu*. D'exemples negatius, o sistemes que han fracassat en aquest intent, en tenim un munt: des dels robots mòbils que es van dissenyar l'any 2004 per fer la travessia del desert de Mojave per al DARPA 1st Grand Challenge —i cap dels quals ho va aconseguir—, fins als sistemes experts que a final de la dècada dels vuitanta havien de substituir els metges a les consultes. En cap d'aquests casos, tot i tenir un objectiu ben definit, un sistema de percepció del món que subministrava prou dades per actuar correctament i un sistema efector adequat, el disseny intern dels sistemes no ha estat prou bo per reeixir.

D'exemples absolutament positius només n'hi ha en una categoria: els éssers vius. En aquest cas, amb un disseny intern definit per les lleis de l'evolució biològica i milions d'anys, els agents assoleixen prou satisfactòriament els objectius dia rere dia, des de fa moltes generacions. La mateixa existència d'éssers vius amb capacitats cognitives avançades és una garantia que el problema del disseny té solució. Per tant, segur que no ens trobem davant d'un problema sense sortida. Però tampoc no és segur que hi trobem solució...

### 5.3 Sobre les lectures de les ombres del món (i del propi cos)

El món és una realitat complexa a la qual l'agent només pot accedir parcialment. El món sempre se'ns mostrarà més simple del que és en realitat, fet que genera una incertesa que complicarà les accions, i per tant l'assoliment d'objectius.

Una de les metàfores que millor pot reflectir aquesta situació és el mite de la caverna, de Plató (Atenes, -428/-347). En aquest mite ens descriu un món en el qual els habitants viuen, captius des del naixement i lligats de peus i coll, a l'interior d'una caverna fosca. Els habitants només poden veure les ombres projectades d'uns objectes amb formes animals i humanes que porten uns homes misteriosos, i per a ells aquesta és l'única realitat existent. No poden imaginar-ne una altra de diferent. Fins i tot, segons Plató, si algun d'ells fos alliberat i «descobris» el veritable món, no seria capaç de convèncer els seus companys de la bona nova, els quals fins i tot podrien arribar a assassinar-lo, tal és el grau de la seva ignorància en una situació així.

En el cas d'un agent situat al món real la situació no és gaire diferent. Hi ha una realitat complexa, la realitat física, que es projecta de diferents maneres sobre l'agent i que li permet extreure de manera dosificada informació

útil, tot i que no completa, per a l'assoliment dels seus objectius. Aquest procés l'hem anomenat *percepció*.

Durant molts anys, tant des de les disciplines lligades a la percepció natural com des de la intel·ligència artificial, s'ha considerat el procés perceptiu com un procés de segon ordre, sotmès a les necessitats d'altres processos cognitius de més alt nivell (el raonament, l'aprenentatge, etc.), però hi ha descobriments recents en els àmbits de la ciència cognitiva i la psicologia que discuteixen aquesta aproximació i col·loquen la percepció al mateix nivell d'importància i amb el mateix nivell de complexitat.

Però anem a pams. Per entendre el fenomen de la percepció, cal tenir clara la resposta a les preguntes següents: quina és la matèria primera de la percepció?, quines necessitats perceptives tenim?, com les processem?

### 5.3.1 La informació

El concepte d'*informació*, que hem estat usant fins ara de manera informal, és un concepte recent i que encara no es pot considerar tancat. Una de les primeres accepcions és la creada per Claude Shannon a final de la dècada dels anys quaranta per estudiar la transmissió de missatges per un canal entre un emissor i un receptor. El model de Shannon és una teoria quantitativa de la informació: ens permet mesurar-la, però no ens diu res sobre què és la informació; no és una teoria qualitativa [5].

La importància de la informació rau en el fet que ha estat reconeguda com el concepte fonamental per modelar i entendre una gran quantitat de fenòmens naturals, sobretot biològics, i també artificials. I en el cas dels fenòmens cognitius, tant en el món artificial com en el natural, la informació també hi té un paper clau i central.

En la natura, la necessitat de processament de la informació es genera en el moment que alguns organismes vius «descobreixen» que l'acció, la capacitat de modificar el seu entorn immediat, té avantatges reproductius i de supervivència. Fins llavors podríem dir que qualsevol canvi en un entorn era el resultat de les forces físiques que hi actuaven. Però llavors apareixen organismes (vius) que són capaços d'iniciar una acció o de seleccionar respostes a estímuls externs, i per fer-ho necessiten adquirir informació, processar-la i usar-la. Aquesta informació s'usa per detectar la presència de depredadors, seleccionar amb qui relacionar-se sexualment, anticipar les accions d'un altre organisme, determinar les zones amb aliments, etc.

Definir el concepte d'*informació*, més enllà del model de Shannon, és una tasca difícil i encara oberta. Aaron Sloman, un filòsof de la Universitat de Birmingham especialitzat en sistemes cognitius, fa una comparació

interessant d'aquesta tasca amb la que va significar per a Newton la definició d'*energia* [5]: comprenia Newton el significat d'energia?, el comprenem nosaltres quan l'expliquen a l'escola o a la universitat? Bé, depèn de què entenguem per *comprendre*. Si entenem que *comprendre* vol dir *definir*, ho tenim complicat. Però no és l'únic cas. Hi ha força conceptes que no es poden definir fàcilment: *matèria*, *energia*, etc. Són el que A. Sloman anomena *conceptes científics profunds*. Però aquests conceptes són comprensibles, implícitament, si som capaços de definir-ne el rol en les teories i els dissenys dels fenòmens i sistemes en què intervenen.

En el cas de la informació (i de l'energia, i de la matèria!), per comprendre de manera completa el concepte caldria descriure els tipus d'informació que hi ha, les formes que pot prendre, les maneres com es pot adquirir, com es pot manipular, com es pot emmagatzemar o transmetre, quins són els usos i amb quins objectius, quines architectures ens permeten combinar-la, etc. Si entenem tot això no cal definir-la, però el que queda clar és que la informació no són dades, sinó dades que se saben usar (processades i convenientment emmagatzemades)!

La informació té una sèrie de propietats que la distingeixen de molts conceptes físics i que val la pena remarcar:

- Alguns dels rols de la informació els pot implementar internament el sistema cognitiu, però d'altres es poden fer en cooperació (sempre que el sistema tingui una forma de comunicació) entre diferents sistemes cognitius.
- Si transmeto la informació, encara la conservo (a diferència de l'energia!).
- Puc crear informació nova a partir de l'antiga, i tenir les dues!
- La dimensió de variació principal de la informació no és la quantitat, sinó l'estructura i el contingut.

La realitat és que encara moltes de les preguntes que hem descrit no tenen una bona resposta, i caldrà fer més investigació científica per contestar-hi. N'hi ha una però que val la pena exposar: els ordinadors, tal com els coneixem avui en dia, poden implementar tots els rols descrits —i els que puguin aparèixer en el futur— i per tant ser les màquines universals de processament de la informació? De moment no tenim més remei que assumir que sí, però cal no oblidar que cal seguir reflexionant-hi.

Resumint, un agent situat al món real pot accedir a una aproximació de la realitat si és capaç de convertir en informació (i usar adequadament) aquells aspectes del món que es puguin llegir.

### 5.3.2 Les dades

El món real està format per dos tipus d'objectes: els objectes inerts i els objectes que processen informació i actuen. Tal com hem explicat, els primers estan a la mercè de les lleis físiques i els segons, tot i estar sotmesos a les mateixes lleis i gràcies a disposar de magatzems d'energia, tenen un cert grau de llibertat. Com pot un agent fer-se una idea d'aquest món exterior? Com pot determinar quins objectes hi ha, on són, quants n'hi ha, etc.? Només d'una manera: sent sensible a algunes formes d'energia i tenint algun sistema transductor que converteixi l'energia mesurada, les dades, en informació.

L'energia pot prendre moltes formes, i a la natura trobaríem molts exemples d'éssers vius que disposen de sistemes per mesurar-la i convertir-la en informació. Per exemple, la majoria d'animals complexos són sensibles a les radiacions electromagnètiques amb una longitud d'ona d'entre 400 nanòmetres i 700 nanòmetres (aquest tipus d'energia es coneix com a *llum visible*). Ser sensible vol dir disposar d'algun mecanisme físic que respongui a aquest tipus d'energia i tenir la capacitat d'emmagatzemar i de processar aquests senyals.

*Visió* és el nom que pren aquesta capacitat aplicada a la llum. Per tenir percepció visual és necessari que l'agent disposi d'algun material fotosensible que transformi la llum que arriba en dades, normalment codificades en un senyal elèctric.

En el cas que vulguem que l'agent sigui sensible a ones de pressió de (les molècules de) l'aire, i pugui llegir els sons corresponents a les veus humanes i similars, llavors necessitem un sistema de lectura de les variacions de pressió que treballi a una freqüència d'entre 8 hertz i 16 kilohertz, i les codifiqui en un senyal elèctric. Llavors podem dir que l'agent disposa del mecanisme necessari per tenir percepció acústica.

El tacte, o percepció hàptica, es basa en un conjunt de mecanoreceptors situats sota la superfície de l'agent que entra en contacte amb el món, sota la seva «pell». Aquests receptors són sensibles als lleugers canvis de pressió que exerceixen les superfícies dels objectes quan són tocades i permeten experimentar les textures. El tacte és l'únic dels sistemes sensitius que no està localitzat en un punt concret del cos de l'agent; el recobreix tot, però

pot ser útil que la seva densitat no sigui uniforme i hi hagi zones del cos (mans, dits) més denses i sensibles.

Les relacions entre aquests sistemes són moltes i complexes, i en cap cas es poden considerar independents. Hi ha molts exemples que mostren aquestes interdependències: la relació entre sons i imatges pot generar en un observador humà percepcions visuals inexistents; la relació entre tacte i acústica és clara quan toquem alguns objectes durs de textura molt tènue; etc.

Més enllà de la percepció del món ens podríem preguntar a quins altres fenòmens hauria de ser sensible un sistema cognitiu artificial. Si prenem com a referència el cas dels humans, ens trobarem un sistema sensorial, complex, que percep l'estat del propi cos. En aquest cas, les tasques es reparteixen entre dos sistemes:

- El sistema somàtic és l'encarregat de donar informació al cervell sobre la configuració del cos, sobre si hi ha algun tipus de dany o desperfecte, sobre els punts de contacte amb altres cossos i sobre les característiques d'aquests altres cossos. Els subsistemes identificats són el tacte i la pressió, la temperatura, la propiocepció (a partir de sensors en les articulacions, tendons i músculs, ens dóna la posició i el moviment associat a cada una de les extremitats), i el dolor. Cada submodalitat pot registrar la intensitat de l'estímul, la duració i la localització al cos.
- El sistema visceral, que regula el nostre «interior», està present a les estructures cardiovasculars, als bronquis i pulmons, l'esòfag, l'estómac, els intestins, el ronyó, el fetge, el pàncrees, les estructures urinàries, les glàndules de la suor a la pell i els genitals.

Més enllà de la utilitat evident de controlar el funcionament del propi cos i ser conscient dels problemes, ens podríem preguntar si aquest tipus de percepció és estrictament necessari per a un sistema cognitiu artificial (sigui quina sigui la realitat física del cos). Una hipòtesi que emergeix amb molta força en el camp de la filosofia i de la ciència cognitiva és que la resposta és radicalment afirmativa. I el motiu és que, per tenir consciència, sembla necessari que el cervell humà disposi internament d'una representació del propi cos, per poder manipular-la i predir les conseqüències de les possibles accions en el món. Però deixem de moment el tema de la consciència. Ja hi haurà temps per parlar-ne.