

REIAL ACADÈMIA DE MEDICINA DE CATALUNYA

# MÀQUINES, ORGANISMES I SISTEMES

*DE LA BIOROBÒTICA A  
LA VIDA ARTIFICIAL*

DISCURS

llegit per l'Acadèmic Electe

**Excm. Sr. Dr. GABRIEL FERRATÉ I PASCUAL**

el dia 21 de maig de 1995

en l'acte de la seva recepció

DISCURS

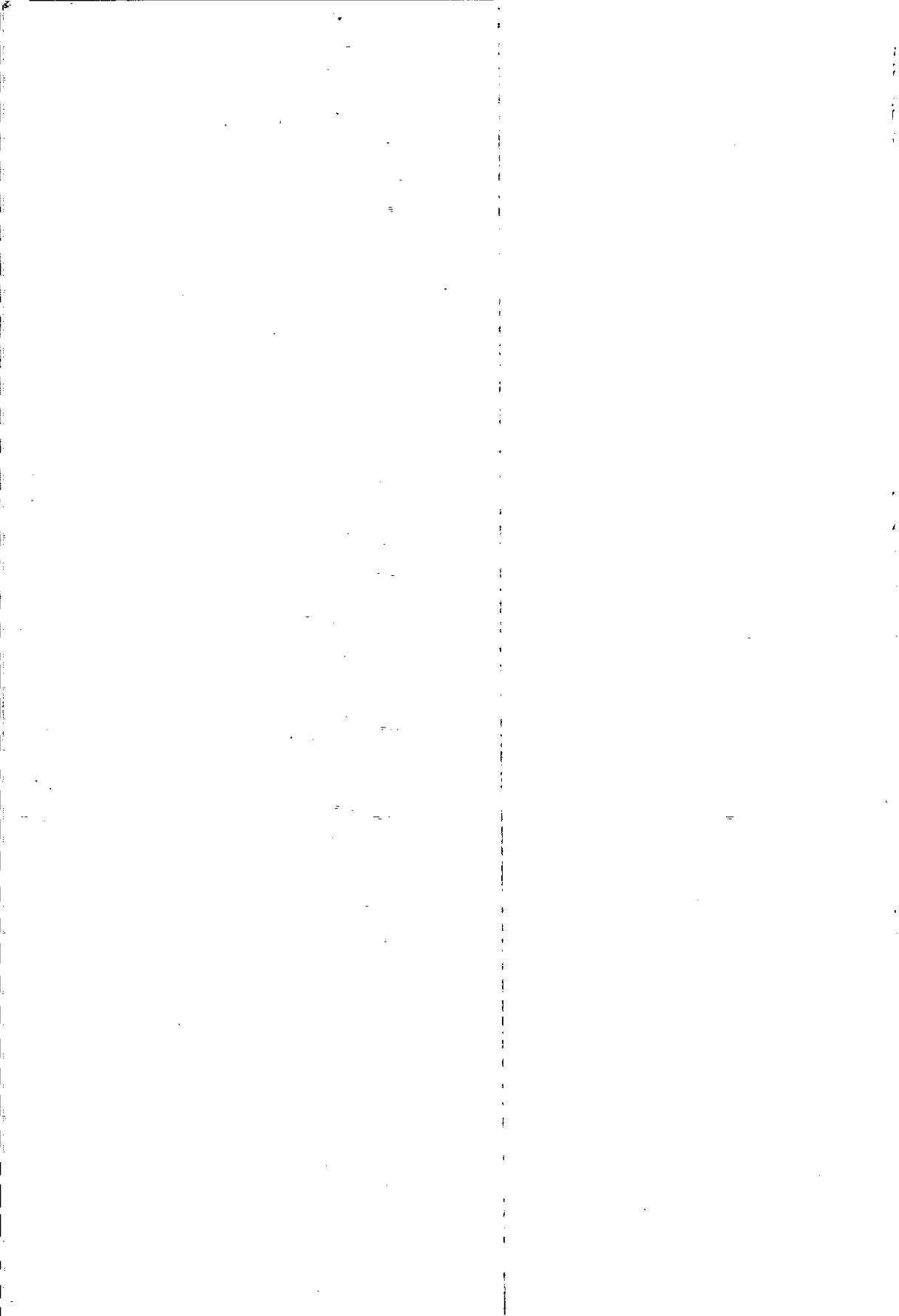
de resposta de l'Acadèmic Numerari

Molt Il·ltre. Professor

**Dr. FRANCESC PUCHAL I MAS**

Barcelona

1995







**MÀQUINES, ORGANISMES I SISTEMES**  
*DE LA BIOROBÒTICA A*  
*LA VIDA ARTIFICIAL*



REIAL ACADEMIA DE MEDICINA DE CATALUNYA

# MÀQUINES, ORGANISMES I SISTEMES

*DE LA BIOROBÒTICA A  
LA VIDA ARTIFICIAL*

DISCURS

llegit per l'Acadèmic Electe

**Excm. Sr. Dr. GABRIEL FERRATÉ I PASCUAL**

el dia 21 de maig de 1995

en l'acte de la seva recepció

DISCURS

de resposta de l'Acadèmic Numerari

Molt Il·ltre. Professor

**Dr. FRANCESC PUCHAL I MAS**

Barcelona

1995

Impressió: El Tinter  
Dipòsit Legal: B-19.594-95

DISCURS

llegit per l'Acadèmic Electe

**Excm. Sr. Dr. GABRIEL FERRATÉ I PASCUAL**

el dia 21 de maig de 1995

en l'acte de la seva recepció



Aquests homes que estan a prop de les màquines  
Aquests homes que treballen per les màquines  
Aquests homes que ploren per les màquines  
Aquests homes que no viuen per les màquines  
Aquests homes que es moren per les màquines  
Aquests homes que no saben el perquè de les màquines  
Aquests homes quan arribarà l' hora seran màquines

**Joaquim Horta**  
*Home amb màquina*



Excel·lentíssim Sr. President,  
Molt il·lustres Srs. Acadèmics,  
Digníssimes autoritats,  
Senyores, senyors,

Voldria que en l'inici del discurs de recepció en aquesta Reial Acadèmia de Medicina de Catalunya em fos permès expressar unes reflexions prèvies, molt personals, que giren entorn de tres sentiments bàsics: l'agraïment, el record i l'esperança.

En primer lloc, vull fer constar el meu agraïment als Il·lustres Senyors Acadèmics per l'honor de poder accedir a aquesta docta Corporació i poder compartir en el futur i des d'ara la seva amistat i la seva tasca acadèmica, en la qual desitjo col·laborar en la mesura del que sigui personalment possible i institucionalment necessari. Però l'agraïment degut adquireix, en el meu cas personal, unes dimensions extraordinàries ja que, no essent la medicina la meua professió, és encara més d'agrair que se m'atorgui la confiança que des de la meua especialització pugui contribuir, d'alguna manera, a engrandir o complementar, com a Membre Numerari d'aquesta Institució, l'aportació que les activitats acadèmiques poden fer al coneixement rigorós i profund de la vida. També soc conscient, en dir tot això, que haig d'agrair la deferència, l'honor i la benevolència d'haver optat per la meua persona per a un lloc que, ben certament, no creia pas merèixer.

En segon lloc, vull que em permetin compartir amb tots vostès, que tan amablement assisteixen a aquest acte tan estimat per mi, unes evocacions de record. Són aquells pensaments que la ment et retorna a primer pla en ocasions com aquesta. Vénen a la memòria records de l'Institut de Batxillerat de Reus –com no recordar la professora Angeleta Ferrer que em va iniciar en les meravelles de les Ciències Naturals!– els primers estudis com a Enginyer Tècnic Agrícola i els anys de carrera com a Enginyer Industrial. Els records dels vells i respectats professors es barregen amb els dels deixebles joves, col·laboradors i doctorands als quals vaig iniciar en l'apassionant món de la recerca. La meva activitat científica s'ha centrat sempre en el món de l'Automàtica i de la Informàtica i les seves múltiples aplicacions i desenvolupaments. Però aquesta activitat sempre ha anat paral·lela a moltes altres activitats d'organització i gestió acadèmica o de la investigació. Els vint anys com a rector de la Universitat Politècnica de Catalunya són segurament un testimoniatge de la meva preocupació tant “per fer” com “per impulsar a fer”.

En tercer lloc, i enllaçant amb les activitats docents i de recerca abans citades, voldria fer esment de treballs propis on temes frontera de la recerca mèdica han esdevingut motors inspiradors d'investigació automàtica, informàtica o robòtica. Em vénen a la memòria els cursos i treballs sobre visió artificial i bioenginyeria cardíaca –sempre fets amb la inestimable i valuosa col·laboració dels meus companys de l'Institut de Cibernètica, als quals vull agrair explícitament tot el suport que sempre m'han prestat– modelitzant dinàmicament i simulant el sistema cardíoc-vascular, analitzant vàlvules cardíques artificials o dissenyant instrumentació biomèdica electrònica per a monitorització contínua en hospitals. Recordo bé aquells equips –dissenyats i desenvolupats a l'empresa EYSSA– que als anys seixanta permetien monitoritzar electrocardiogrames, l'histograma, la pressió sanguínia de diversos tipus, la contractilitat miocàrdica, l'activitat respiratòria, la temperatura corporal i l'electroencefalograma entre d'altres factors.

I ara, deixin-me justificar breument per què acabo de fer referència tant a la meva formació inicial d'enginyer com a les aplicacions en medicina que han format part de les meves activitats. La justificació última de la meva incorporació a aquesta institució, i per la qual em sento honrat en acceptar aquest nomenament, és la creença ferma, personalment assumida en la meva trajectòria professional, que amb el diàleg pluridisciplinar i en la interacció de diferents coneixements i tècniques, hom pot obrir noves finestres des d'on albirar els horitzons del progrés científic, tècnic i humà. Encara que pugui semblar paradoxal els grans avenços de la Humanitat en aquesta fi de segle i de mil·lenni, provenen tant de la super-especialització, com dels trencaments de fronteres i la globalització dels coneixements!

He consultat dades sobre el naixement i evolució d'aquesta Reial Acadèmia de Medicina de Catalunya i he descobert amb agradable sorpresa que, ja des de la seva fundació pel rei Carles III, l'Acadèmia sempre mostrà interès per integrar en el seu si a persones que no essent metges poguessin enriquir d'alguna forma la pròpia vida i la projecció de les importants sessions acadèmiques.

Se'n parla a la Reial Ordre del 18 de juliol de 1785, on dintre les cinc classes de "socis" –els acadèmics d'avui– es fa menció dels "honoraris, residents, íntims o forans nacionals i estrangers, lliures i corresponsals". Confesso que aquesta denominació de "soci lliure" de 1785 la trobo, encara avui, especialment suggeridora. Seguint la recerca històrica es descobreix que, en el vell catàleg de 1798 inclòs a les *Memorias de la Real Academia*, s'hi enumeren entre d'altres, i com a "socis lliures": dos "catedràtics de Química", un "professor de botànica", dos presbíters, un fiscal i un "oïdor" de la Reial Audiència, dos cirurgians de Càmera de S.M. i una senyora de Saragossa de la qual no es detalla títol. En tota la seqüència d'Estatuts i Reglaments de l'Acadèmia, de 1874, 1886, 1929 i posteriors legislacions, es posa de manifest l'obertura acadèmica vers els professionals no sanitaris. També en els primers Estatuts aprovats

per la Generalitat de Catalunya el 13 d'abril de 1988 s'afirma, en l'article 6è, que "és indispensable per ésser acadèmic numerari haver-se distingit en l'exercici de la medicina o de les professions afins", i concreta "dels 60 acadèmics numeraris es reservarà un 20%, com a màxim, per a ciències afins a la medicina". L'actual composició d'aquesta Acadèmia també em ratifica en la idea que, malgrat no entrar a ocupar un seient anteriorment ocupat per un il·lustre acadèmic, ben segur que podrem establir ponts de diàleg i col·laboració que no han de ser enfocats al nostre propi plaer intel·lectual sinó a l'avenç en el coneixement de l'ésser humà, en totes les seves dimensions.

Ni l'Enginyeria ha de ser la "medicina de la Natura" ni la Medicina, l'"enginyeria de la Salut". Per sobre de tot, la ciència i la tècnica en totes les seves branques, han de perseguir que la vida en aquest planeta Terra sigui sempre de la major qualitat possible. És fonamentat en aquesta utopia realista que passo a exposar el meu discurs de recepció en el qual penso fer algunes reflexions sobre els conceptes de vida i de màquina, d'ésser viu i d'ésser artificialment creat, intentant esbrinar el perquè de l'abís que continuem trobant entre la més insignificant partícula de vida i la més sofisticada creació de l'enginy humà.

El meu objectiu és efectuar un breu recorregut per algunes de les fronteres on es troben i es complementen coneixements i tècniques del món material i del món de la vida, és a dir, l'àmbit interdisciplinari en què conflueixen enginyers, metges, químics, biòlegs, físics, matemàtics, veterinaris, psicòlegs, informàtics i, en general, tots aquells especialistes de camps diversos que obren noves vies a la recerca i a l'experimentació en els dominis de l'enginyeria biomèdica i de les ciències que li donen suport o que li són afins. En qualsevol cas, és evident que sembla enriquidor i positiu per al progrés de la ciència afavorir el treball en equip de científics provinents de diverses àrees del coneixement, com ara les més amunt esmentades.

L'aproximació interdisciplinària permet d'obrir nous horitzons a la recerca i trobar solucions noves i imaginatives a vells problemes. El disseny de sistemes de visió artificial inspirats en els òrgans de visió de determinats animals, la utilització de models propis de la teoria de control per explicar comportaments anòmals del sistema cardío-vascular, o bé el desenvolupament de tècniques de computació mitjançant xarxes neuronals, no són sinó exemples de desenvolupament i treballs basats en la utilització de tècniques i coneixements provinents de camps diferents per mitjà d'equips interdisciplinaris.

\* \* \*

Permeteu-me ara, abans de finalitzar, que em dirigeixi de manera singularitzada a alguns de vostès. En primer lloc vull manifestar la meua més alta estima, consideració i respecte pel Dr. Moisès Broggi. Com a president que fou d'aquesta Reial Acadèmia atorgà la seva confiança inicial a la presentació de la meua candidatura que féu el Dr. Francesc Puchal. Li agraeixo també al Dr. Broggi que m'hagi volgut acompanyar avui.

Són ja molts els anys d'amistat que m'uneixen amb el Dr. Francesc Puchal des d'aquell dia llunyà en què va acceptar, venint de Madrid, de responsabilitzar-se d'un grup de recerca a la Universitat Politècnica. Li agraeixo, així mateix, que hagi assumit la responsabilitat de fer el discurs de resposta.

Al Dr. Josep Sèculi vull agrair-li l'afecte i tots els consells i l'important ajut prestat per a l'elaboració del meu treball, així com el seu acompanyament en aquest acte de recepció.

He de referir-me, finalment, a l'actual president d'aquesta Reial Acadèmia, el Dr. Josep Laporte, que ha anat acceptant amb comprensió i elegància els successius endarreriments en l'entrega d'aquest treball. Ens uneixen molts anys de col·laboració i d'amis-

tat: primer com a company rector, després com a responsable de les universitats catalanes i sempre com a benvolgut i estimat amic.

A tots vosaltres, a tots els qui han volgut acompanyar-me en aquest acte, moltes gràcies!

“El raonament és sempre el mateix, tant en les ciències que estudien els éssers vivents com en les que s’ocupen dels cossos inerts. Però en cada ciència o en cada grup de ciències, els fenòmens varien i presenten una complexitat i unes dificultats a la investigació, peculiars.”

**Claude Bernard**

## **1. INTRODUCCIÓ**

### *El què i el perquè*

Vivim en un univers complex, evolutiu i fèrtil; un univers ric en formes i organitzacions, en el qual s’ha generat la vida i que, en un procés creatiu permanent, ha evolucionat fins a l’aparició de l’ésser humà, qui ha deixat l’empremta sobre el seu entorn. Així, l’ésser humà amb la seva intel·ligència, la seva capacitat creadora i la seva tecnologia, ha produït objectes i màquines, ha generat processos i, sobretot, ha elaborat mons culturals i intel·lectuals, tot contribuint a l’increment de la complexitat real del món que ens envolta o al de la percepció que en tenim.

Immergit en aquest món complex de què depèn i al qual està subjecte, l’ésser humà ha intentat descobrir els secrets i les lleis que el regeixen, per tal de –tot sigui dit– poder-se’n aprofitar. En particular ha tingut una especial preocupació per conèixer tot allò que fa referència a ell mateix, com a ésser viu, i als altres animals i plantes que l’envolten: la seva naturalesa, la seva relació amb el món exterior, l’origen i evolució, la superació de les seves mancances i malalties.

En aquesta progressió imparabile vers els límits del coneixement, per bé que les fronteres no estiguin clarament diferenciades, hem actuat i actuem sota l’estímul de la *curiositat* o empesos per la *necessitat* de trobar solucions als nostres problemes...

\* \* \*

Tal com acabo d'indicar, la *curiositat*, el desig de saber, ens ha impulsat a conèixer i a comprendre les lleis que governen i regeixen el nostre univers, tant l'exterior, el món físic i l'entorn, com l'interior, la persona mateixa de l'observador. Un univers amb matèria i cossos inerts i amb matèria i cossos vivents. Un univers en què alguns han pretès veure una dualitat irreconciliable entre la "*res extensa*" i la "*res cogitant*", com a paradigmes de la matèria i de l'esperit, però que, en qualsevol cas, si més no des d'un punt de vista reduccionista, està tot ell subjecte a les mateixes lleis bàsiques i universals, si bé aquestes poden resultar irrellevants per a comprendre o explicar els fenòmens de la vida i de la ment.

Des que Claude Bernard (1857 i 1865), amb la seva teoria del "medi intern", introdueix els principis de la regulació biològica, que Walter B. Cannon (1929) formalitza mitjançant el concepte d'homeòstasi (o de "*feedback*"), i Norbert Wiener (1948) generalitza al conjunt dels sistemes biològics, cognitius, econòmics i socials amb la noció de cibernètica, el progrés ha estat enorme.

S'ha aprofundit en l'estudi de les similituds i dissimilituds entre el concepte de vida i el de màquina; les propietats essencials que diferencien el que és natural del que és artificial; el que és viu del que és realment inert. L'atzar, la causalitat, el caos, l'ordre, el determinisme, són conceptes bàsics importants per a la correcta interpretació dels fenòmens que caracteritzen els sistemes dinàmics i els éssers vius i distingeixen els uns dels altres. Molt sovint no són interpretats correctament, i fins i tot, es tergiversen en la seva aplicació.

Així, modernament, els estudis sobre els mecanismes de la intel·ligència i de la ment han propiciat el desenvolupament de l'anomenada *intel·ligència artificial* lligada a la utilització dels moderns computadors. Més recentment, el desig de trobar una explicació al fenomen mateix de la vida, de la seva aparició o creació i de la seva evolució ha generat l'aparició de teories com les dels sistemes

anticipatoris, automodificants o autoinformacionals, sobre les quals es basteix una nova disciplina que tracta sobre l'anomenada *vida artificial*.

Des de temps immemorials, l'ésser humà ha somniat amb la possibilitat de crear autòmats capaços d'imitar les funcions desenvolupades pels éssers vius, i fins i tot, la de crear vida... La vida artificial, entesa com l'estudi de sistemes concebuts o construïts per l'ésser humà, que exhibeixen comportaments característics de la vida, es planteja, doncs, produir artificialment vida. Aquesta vida – si és que és vida– es basa, de fet, en un concepte de vida més ampli que el que coneixem: tal com podria ser en altres planetes, amb altres materials o, fins i tot, en el món abstracte de les computadores. Aquest darrer enfocament és el que té més adeptes i s'estan desenvolupant ambients i criatures artificials que formen àdhuc ecosistemes evolutius. Si bé la vida artificial, tal com es concep actualment, no és en el fons més que una simulació, té potencials avantatges per estudiar fets profunds relacionats amb la vida biològica que coneixem i la seva evolució.

El que mai no hem de perdre de vista és que, finalment, les teories matemàtiques i físiques que hom desenvolupa no pretenen ser sinó models més o menys ajustats de la realitat. Un model, que en el fons no és més que una descripció, es valora en funció de la seva capacitat de previsió de determinades actuacions o comportaments, i no s'ha de confondre mai amb la realitat mateixa.

\* \* \*

La *necessitat* ha fet que l'ésser humà en el transcurs del temps hagi anat creant i desenvolupant dispositius, elements, tècniques i processos per ajudar-se a si mateix en la seva activitat diària o en la seva lluita per l'existència i la vida. Això li ha permès de complementar les seves habilitats o de substituir els seus propis òrgans, de superar les seves mancances o disfuncions orgàniques o funcio-

nals. L'objectiu és fer millor o més còmodament –o simplement poder arribar a fer– allò que sense ajut li resultaria impossible o difícil de realitzar o d'assolir. Generalitzant, podríem dir que l'eina, el motor i el computador, com a potencials substituïts de la mà, del múscle o del cervell, esdevenen paradigmes de l'acció, de la força i de la ment en la nova civilització tecnològica que emergeix.

En l'àmbit de l'enginyeria biomèdica, que és el que aquí ens ocupa, podem trobar molts exemples d'interrelació entre el que més endavant anomenarem de manera general la *màquina* –com a símbol o paradigma d'element o ens artificialment concebut, fabricat o elaborat– i l'ésser humà, bé sia de forma global o amb el seu cos, els seus sentits o la seva ment. Els mecanismes, dispositius o sistemes que conceptualitzem sota la denominació de màquina poden substituir o complementar un membre o un òrgan anatòmic de la persona. Així mateix poden substituir o dur a terme una funció de l'organisme o de la persona.

Les pròtesis, l'estimulador cardíac, la robòtica interactiva i la robòtica quirúrgica, els sistemes de visió artificial, els òrgans artificials i la realitat virtual són uns pocs exemples de la diversitat i riquesa d'enfocaments i solucions que el concepte d'interacció persona-màquina pot arribar a generar.

“El millor model material d’un gat és un altre gat.  
Possiblement el mateix gat.”

**Arturo Rosenblueth**

Article en col·laboració amb N. Wiener

## **2. MÀQUINES I VIDA**

### *Determinisme, atzar i causalitat*

Parafraçant Shakespeare podríem dir: “Som o no som màquines. Aquesta és la qüestió”. De fet, és una qüestió que probablement no té una resposta única i immutable; possiblement no en té ni tan sols cap, podria ser fins i tot que no estiguem realment interessats que en tingui! És un problema que depèn molt del contingut semàntic que vulguem donar als mots emprats i de les assumpcions que fem a l’hora d’establir-los i de derivar-ne, les conseqüències. Així mateix, el llenguatge i el context en què s’utilitza estan fortament interrelacionats i no estan desprovistos d’implicacions filosòfiques.

Hem de constatar que molts del problemes amb què ens enfrontem quan tractem temes que es troben a les fronteres del coneixement no són únicament científics, sinó també filosòfics. Hi ha qui diu que la filosofia és irrellevant per a la ciència. Això no és cert, l’afirmació mateixa, que és de caire filosòfic, es refuta a sí mateixa. La filosofia no pot ser evitada, el que en tot cas podem fer és ignorar-la; de la mateixa manera que podem viure feliços i contents sense ser conscients que per fer-ho ens cal respirar...

Qualsevol persona, encara que només sigui superficialment co-neixedora de la filosofia moderna, haurà d’admetre que no és cap revelació dir que la ciència, la dels models predictibles, o qualsevol altre forma de coneixement, té inherents limitacions.

En uns moments en què estem encara sotmesos a l'impacte pel buit que ha produït entre nosaltres la mort de Karl Popper, filòsof de la ciència d'aquest segle, no puc deixar de recordar algunes de les seves consideracions entorn del fenomen de la vida. Segons Popper, de manera similar al que passa en la ciència, la vida "l'ha encertada" tants cops perquè se n'ha equivocat molts més. Segons ell la meravellosa i complexa organització de la vida, i, fins i tot, la nostra naturalesa, no són el resultat d'un disseny premeditat ni d'una planificació infalible; són més aviat el fruit fecund de l'atzar i de la pressió selectiva. Sense errors no hi hauria hagut progrés biològic i nosaltres no estaríem aquí presents per a dir-ho. L'assaig, l'error i el risc són les fonts de la vida i l'origen de la creativitat.

La por d'equivocar-nos pot paralitzar el nostre dinamisme intel·lectual i ens pot frenar de fer suposicions arriscades o de tenir idees inèdites. El nostre repte és assumir el risc d'equivocar-nos per tal de tenir l'oportunitat d'encertar. Tota una lliçó de llibertat intel·lectual i de modèstia!

## **2.1. Les màquines**

El *Diccionari enciclopèdic de Medicina* (1990) defineix la màquina de la següent manera:

“Nom genèric dels aparells que fan possible la producció, la conversió o la transmissió d'alguna forma d'energia i força.”

La *Gran Enciclopèdia Catalana* (1986) descriu la màquina com:

“Conjunt més o menys complex de peces sòlides (eixos, rodes, barres, etc.) que serveix per a transformar un tipus d'energia en treball o en un altre tipus d'energia, o bé per a aprofitar l'acció d'una força per tal de produir certs efectes.”

Aquesta definició és gairebé equivalent a l'anterior i molt similar a la que es troba a totes les enciclopèdies i diccionaris. Ara bé, la Gran Enciclopèdia Catalana hi afegeix una altra accepció referida a las *màquines de senyals*, sobre les quals indica:

“[...] d'aparició més recent, són destinades a manipular senyals d'informació, emprades per a fer càlculs, comparacions, identificacions, etc. i en general per a efectuar tota classe d'operacions lògiques (camp de la cibernètica)”.

Al marge de les seves limitacions i de l'encert en el redactat, aquesta darrera definició de màquina aporta una nova dimensió menys “mecànica” de la màquina, ja que al concepte de manipular –modificar, transmetre, produir, convertir...– magnituds de l'àmbit de la mecànica, com ara l'energia, la força i el treball, hi afegeix el de manipular –calcular, comparar, operar...– magnituds de l'àmbit de la *informació*. El salt conceptual és important; en primer lloc perquè és més general i en segon lloc perquè, en certa manera, ens apropa les màquines i ens les fa una mica més com nosaltres... Amb aquesta extensió del concepte, les màquines mateixes esdevenen, com a tals, protagonistes del paradigma entorn de l'acció de la força i de la ment a què m'he referit més amunt.

De fet, una característica essencial de les màquines és que són *sistemes construïts*. No són objectes naturals en el sentit que no els trobem a la natura. Les màquines són concebudes, planificades i realitzades –creades– per voluntat de l'ésser humà i per a la seva conveniència o distracció.

Quan hom “crea” una màquina, crea literalment un petit univers amb les seves pròpies regles; un sistema que en cap cas no es comportarà de manera no prevista. Una màquina només farà allò que hem previst que faci; es limitarà a reflectir la informació que hi haguem posat durant el seu disseny i el seu procés de fabricació. Una màquina es comprèn com un sistema especial, les parts o unitats del qual mantenen entre elles una relació o comportament prefixat.

Una màquina, per complexa que sigui, només pot desplegar una única seqüència global d'esdeveniments pre-definits. La seva transparència teòrica és total, la qual cosa no vol dir que, a la pràctica, no ens pugui sorprendre el seu comportament a causa de les nostres mancances en la comprensió de la interrelació entre les seves unitats o la d'aquestes amb l'entorn. Tot això és veritat mentre la màquina mantingui la seva identitat com a tal i no s'espantlli per culpa del desgast o de l'envelliment dels seus components. Ara bé, de la mateixa manera que no és de bon to parlar a taula de la mort, tampoc no s'acostuma a parlar d'aquests processos degeneratius quan ens referim a les propietats i característiques de les màquines... No saltres només parlem de màquines perfectes que funcionen segons el seu mode dominant!

Si aprofundim una mica més descobrirem que podem distingir dues conceptualitzacions diferents de les màquines:

- Com a sistemes “mecanicistes”.
- Com a sistemes “creats”, és a dir, encotillats per condicions de contorn.

Aquestes dues caracteritzacions no són contradictòries i, fins i tot, són necessàries per comprendre el que podríem considerar la doble naturalesa de les màquines, la seva doble aparença segons el punt de vista emprat.

El concepte usual de màquina és més a prop de la primera noció: una màquina és un sistema mecanicista típic, i hi ha una clara relació etimològica entre els dos mots.

D'altra banda, les màquines i els sistemes planetaris, per posar un exemple, tenen en comú que ambdós són sistemes creats. Són fixos en el temps i per sempre, almenys per un període suficientment llarg perquè les relacions que els defineixen com a sistemes puguin ser considerades invariants des del punt de vista d'aquella persona que en fa el model.

Podrem ara intentar una nova visió de màquina definint-la com “un conjunt definit de relacions sobre un conjunt fix de parts”, que no per curta deixa de ser molt general i ens inclou les diverses conceptualitzacions esmentades. Expressat d’una manera més planera podríem dir que el que caracteritza una màquina és que essent un mecanisme o dispositiu contruït –creat– per l’èsser humà, posseïx un esquema d’interaccions bàsiques entre els seus elements que defineixen la seva identitat i proporcionen un comportament de conjunt.

Aquestes definicions són aplicables tant a sistemes físics com a sistemes abstractes o autòmats. En el primer cas, les interaccions estaran definides per les propietats dels elements materials que els componen i les condicions de contorn imposades i, en el segon cas, són les anomenades *primitives lògiques* que defineixen l’esquema d’interaccions. Des del punt de vista de la formulació o modelització teòrica, els primers són *sistemes dinàmics* descriptibles per *equacions diferencials* i els segons són *sistemes formals* descriptibles per *regles* –subjectes a la teoria d’autòmats–.

Cal fer notar que tots dos sistemes, el mecanicista, definit per equacions diferencials, i el lògic o formal, definit per regles, són equivalents.

L’equivalència de tots dos sistemes va quedar aclarida a mitjan anys trenta quan Turing (1936) i Church (1936) van demostrar que qualsevol procés per arribar a decidir la validesa o falsedat d’un plantejament lògic es podia *codificar* mitjançant un programa per a una màquina de calcular ideal anomenada Màquina Universal de Turing. Qualsevol computador imaginable o construïble, per complex que pugui ser, es pot considerar un cas particular de la Màquina Universal de Turing. La conclusió és el resultat, que pot semblar força extraordinari, que qualsevol porció del coneixement que es pugui deduir a partir d’un conjunt de regles es pot obtenir també per un procés de càlcul. En altres paraules i generalitzant: “tot el

que es pot conèixer per raonament racional és equivalent a allò que és computable”, la qual cosa vol dir que són també *processos isomòrfics!*

A partir d'aquest punt va ser fàcil poder demostrar que hi ha igualment isomorfisme entre els sistemes formals i els processos dinàmics, ja que també són tots calculables!

## 2.2. La vida

Per simetria amb el que hem fet més amunt amb les màquines hem consultat la definició de la *vida* que dóna el *Diccionari enciclopèdic de Medicina*:

“estat dinàmic de la matèria organitzada caracteritzat bàsicament per la seva capacitat d'adaptació i d'evolució davant els diferents canvis en els medis, i pel fet de poder reproduir-se, és a dir, de poder donar origen a nova vida”,

definició que és una descripció fenomenològica de la vida.

La biologia ha anat desenvolupant una comprensió de la vida de manera essencialment empírica. Basant-nos en formes de vida que ens són familiars, n'hem extret un concepte global que ens ha permès de reconèixer com a éssers vius altres varietats quan les hem pogut observar. La història de la biologia ens mostra també que hi ha una connexió entre l'avenç en el coneixement dels mecanismes de la vida, d'una banda, i la distinció precisa del que són o no són unitats vives i les seves distàncies i proximitats, d'una altra banda.

Avui en dia potser la sola cosa que podem concloure amb certesa és que l'organització biològica consisteix bàsicament en una xarxa de producció de components que, de manera recursiva, regenera els seus components de partença.

Però hi ha més, hem d'admetre sense cap mena de dubte que existeixen processos reals de creació biològica entesa com a auto-producció contínua i emergent de nou material. Aquest és un aspecte important de l'univers i no és una metàfora o una llicència poètica a descartar quan es parla davant un respectable auditori científic...

Molts investigadors i científics consideren avui que és possible que els sistemes canviïn la seva identitat en sentit matemàtic, que incrementin el seu contingut d'informació i que l'utilitzin per canviar la seva constitució mateixa, introduint nous elements d'una manera no previsible.

Potser es dirà que, si més no de forma intuïtiva, aquesta idea no és nova. Qualsevol estudiant universitari admetrà que els humans, éssers biològics fruit de l'evolució, són més complexos que les formes unicel·lulars arcaïques. L'increment de complexitat des de la bactèria a l'ésser humà és degut a un procés evolutiu en el qual, òbviament, hi ha hagut creativitat. També serà fàcil per a molts d'admetre que el pensament és una altra activitat que produeix informació nova i que el procés de pensar –que hem de diferenciar del procés de raonament racional a què he fet referència anteriorment– és també un procés creatiu.

Ara bé, en intentar fer el salt des de la intuïció a l'explicació científica, les coses es compliquen i ens comencem a formular moltes preguntes. Quina és la naturalesa o la descripció matemàtica dels processos creatius de canvi o de pensament? Hi ha realment sistemes amb propietats noves emergents? No deu ser tot això només fruit d'una il·lusió o d'una manera de pensar primitiva o pre-científica?

La resposta "oficial" a aquestes qüestions acostuma a ser decebedorament frustant i insinua que no és de bon to ni tan sols parlar-ne... Molts científics ortodoxos assumeixen implícitament que els

sistemes genuïnament creatius no existeixen: tot el que hi ha digne de ser considerat ciència –en realitat tot el que hi ha– són sistemes descriptibles per models matemàtics o per algorismes de computador que no deixen lloc per a aquests estranys fenòmens mal definits; en tot cas, si sabéssim prou matemàtiques o prou física, tot quedaria sàviament explicat. Segons aquesta línia de pensament l'emergència queda exclosa o bé ja està inclosa en la física o en les matemàtiques. La posició més radical és la dels anomenats reduccionistes.

El *reduccionisme*, com a moviment científic, pretén explicar qualsevol fenomen a partir de les propietats de les parts o components de més baix nivell. Aquesta posició deriva intuïtivament del fet que les màquines són descomponibles o, dit d'una altra manera, estan construïdes de parts estables i separadament accessibles.

Hi ha tres nivells o formulacions reduccionistes: el *reduccionisme ontològic*, que pressuposa encertadament que les lleis bàsiques naturals són universalment vàlides; el *reduccionisme metodològic*, que sosté que hauríem d'intentar explicar tots els fenòmens a partir de les lleis naturals conegudes sempre que sigui possible (és un reduccionisme tolerant); el *reduccionisme epistemològic*, el més radical, que afirma que, en darrer terme, tot es pot explicar per les lleis bàsiques de la física i les propietats dels àtoms. Segons aquests darrers la ciència és un procés de reducció i no ens hem d'aturar abans d'arribar al fons de tot.

El reduccionisme no és un fenomen recent. Vegeu, si no, la curiosa definició de vida que dona Berzelius (1962) en el seu treball *The Origin of Life*:

“La vida és una autorealització parcial, contínua, progressiva, multiforme i condicionalment interactiva de les potencialitats existents en els estats electrònics dels àtoms.”

Jo crec que a Berzelius (1779 - 1848), donada l'època en què ho va dir i el context en què ho va escriure li podem perdonar la frase. El que trobo en canvi difícil d'admetre és que l'autor d'un dels textos més utilitzats en els primers cursos de física de moltes universitats de –fora i d'aquí– pugui posar-hi la següent “perla” (Feynman, 1983) :

“Tot és format per àtoms. Aquesta és la hipòtesi clau. La hipòtesi més important de tota la biologia, per exemple, és que tot el que fan els animals ho fan els àtoms. En altres paraules, no hi ha res que facin els éssers vius que no pugui ser entès des del punt de vista que aquests són constituïts per àtoms que actuen segons les lleis de la física.”

A mi en fa el mateix efecte que si pretenguéssim conèixer les característiques d'un edifici estudiant detingudament les propietats de les rajoles amb què és construït. Poincaré (1854 - 1912) va dir:

“Es fa ciència amb fets, de la mateixa manera que una casa es fa amb pedres, però una acumulació de fets no és ciència, de la mateixa manera que una acumulació de pedres no és una casa.”

Tot el que s'ha dit no implica, òbviament, que l'evolució creativa contradigui les conegudes lleis microscòpiques de la física. Només implica que aquestes són irrellevants per explicar-la. Són com la gramàtica per al llenguatge; són omnipresents i se les respecta, però no ens diuen res de les històries que podem contar. Molt sovint l'actitud entre ingènua i racionalista que s'adopta en la concepció de la ciència es deu al desconeixement de la complexitat real de les coses.

Els raonaments exposats referents a les interpretacions i models teòrics que es fan en referència als sistemes biològics són extrapolables, *mutatis mutandis*, als sistemes cognitius i mentals.

La majoria dels models que s'han formulat per explicar la ment segueixen les mateixes línies anteriorment expressades. Von Neumann (1958) i Ashby (1954) concebeixen màquines pensants basades en autòmats. La utilització de les idees de Turing portà a la concepció de *xarxes neuronals* amb elements de *lògica de llindar* (MacCulloch i Pitts, 1943; Arbib, 1964) i als *perceptrons* (Rosenblatt, 1958). Recentment s'estan desenvolupant sistemes *connexionistes* mitjançant models d'aprenentatge basats en combinacions de teoria d'autòmats i d'equacions diferencials (Fu, 1967; Fukushima, 1984) de forma similar al que fan els models anomenats *d'aprenentatge evolutiu*. Els autors d'aquest darrer principi proposen el mateix model computacional per descriure l'evolució biològica i l'alt funcionament del cervell.

Una aproximació de la qual darrerament es parla molt és la de la intel·ligència artificial, que no és altra cosa que una hàbil explotació de les capacitats dels computadors mitjançant programes que simulen comportaments intel·ligents. Altres metodologies, com els sistemes de raonament deductiu o els sistemes experts, estan basats també en les capacitats dels computadors.

El que s'observa és que la idea d'emprar sistemes determinats pels seus estats com a model de les dinàmiques naturals, està tan arrelat en la ment dels científics que arriba a resultar difícil per a molts d'ells imaginar quelcom de diferent. En general es pot detectar un marcat contrast entre la complexitat i la diversitat dels fenòmens que es volen explicar i la simplicitat i universalitat dels esquemes explicatius realment utilitzats.

A tall d'exemple, ens podem referir als dos procediments que competeixen per explicar el comportament del cervell i que ocasionen profundes i apassionades discussions entre els seus seguidors: utilitzar models basats en el *comportament* o models fonamentats en el *coneixement* (sistemes cognitius).

El primer procediment considera el cervell com una màquina amb senyals d'entrada i de sortida (estímul-resposta) caracteritzada per les pautes de relacions entre els estímuls i les respostes.

El segon, el més modern, el que es basa en el paradigma cognitiu, es fonamenta en la suposició que el comportament és controlat per la manipulació interna de les representacions mentals de l'entorn.

Els defensors dels dos sistemes s'alineen en dues escoles enfrontades: l'una nega el que l'altra emfasitza. En l'una el cervell és una màquina rígida i passiva que es transforma; en l'altra el cervell –o millor la ment– és una organització activa i plàstica que inicia el canvi. Els dos grups no es parlen, assisteixen a congressos diferents i efectuen experiments diferents que interpreten també de manera distinta.

Doncs bé, els dos sistemes són matemàticament equivalents. Un teorema de la *teoria de sistemes* descrit per Kalman, Falb i Arbib (1969) ho demostra! Amb altres paraules: hi ha una profunda equivalència entre les seqüències d'entrades-sortides i les estructures internes que generen aquestes seqüències en temps real.

Emprant la terminologia corresponent de l'àmbit de l'enginyeria, podríem dir que els conductivistes parlen d'un sistema dinàmic amb entrades i sortides i que els amants del paradigma cognitiu es basen en un autòmata. Ja hem vist anteriorment que els dos models són equivalents.

Cal advertir que l'equivalència formal entre dues maneres de modelitzar un fenomen no implica que l'un o l'altre procediment no pugui ser més adequat per estudiar o posar de relleu aspectes concrets d'aquell.

Si ens referim ara a la teoria de l'evolució, ens troben de nou en una situació similar a l'anterior. Els neo-darwinistes afirmen que la causa de l'evolució és externa als sistemes vius (la qual cosa vol dir que l'evolució és dirigida), mentre que les teories basades en la coevolució suggereixen que les causes de l'evolució són intrínseques o internes a la vida (significa que l'evolució és "autònoma"). Aquí també succeeix que la diferència entre les dues teories desapareix quan s'analitzen els dos models matemàtics corresponents. Veiem ara que la novetat que semblava aportar la visió coevolutiva, o sigui, la incorporació de factors interns d'evolució en contraposició als ambientals, desapareix.

Com a resum, podem afirmar que la causa profunda de tot el que hem anat exposant no és altra cosa sinó que tots els models emprats són sistemes dinàmics que evolucionen segons trajectòries pre-definides en funció de les condicions inicials i de les condicions de contorn. Podrem imitar funcionalment el comportament, però no descriurem les causes reals d'aquest.

La naturalesa conté sistemes automodificants que incrementen el seu grau de complexitat i capaços de produir fenòmens curiosos que mai no podran ser explicats per mètodes mecanicistes per molt que els compliquem o que els retorcem. Ara bé, els processos creatius s'han de poder explicar allunyats de connotacions místiques i han de ser interpretables de forma perfectament científica.

### **2.3. Les ruptures del mecanicisme**

La biologia, que estudia la meravellosa complexitat i autonomia de la vida, i la psicologia, que se centra en la facultat dels éssers humans i dels animals superiors de ser sensibles, de poder-se fer dins la ment representacions del món exterior, sempre han plantejat problemes de difícil solució.

Aquests desafiaments, però, han estat contestats permanentment d'una manera o altra, amb més o menys encert. Els científics no acostumen a admetre obertament que saben molt poc sobre un tema concret...

Hi ha hagut moltes temptacions de crear noves estructures matemàtiques més generals que fossin més adequades per a la seva aplicació directa en el context biològic. Des que Laplace, com a conseqüència d'una interpretació radical del determinisme newtonià, va formular el seu mecanicisme (força curiosament en un llibre titulat *Assaig filosòfic sobre probabilitats*), s'ha anat imposant progressivament la utilització de les probabilitats per descriure el món que ens envolta. El mecanicisme es va trencar per tres fronts:

- Els *sistemes estocàstics*, aplicables a sistemes complexos i amb tantes variables que no poden ser tractades separatament i s'ha de recórrer a la utilització de mitjanes i de lleis probabilístiques.
- Els *sistemes quàntics*, aplicables als àtoms i altres partícules elementals per als quals algunes propietats no estan definides i no són més que potencialitats –més o menys probables– fins que una medició en fixa el valor exacte en cada cas.
- Els *sistemes caòtics*, que tenen un comportament molt complex, tot i que ofereixen un aspecte molt senzill i amb pocs graus de llibertat. Aquests sistemes són alhora deterministes i impredecibles!

Les aplicacions de les metodologies anteriors al camp dels sistemes biològics han estat molt diverses. Hastings i Pikelney (segons Kampis, 1991), per exemple, han estudiat *biosistemes probabilístics*. Altres, com Ewens (1979), han aplicat les contribucions de Kolmogorov a la *genètica de poblacions*. La *teoria de les catàstro-*

fes de René Thom (1975), la de les *estructures dissipatives* de Prigogine (Glansdorf i Prigogine, 1971), la *sinèrgica* (Hacken, 1977) han obert també noves perspectives per a l'estudi de l'autoorganització i dels éssers vius.

## 2.4. Els nous paradigmes

Tots els esforços per trobar solucions als problemes plantejats mitjançant la utilització de tècniques cada cop més sofisticades no fa altra cosa que confirmar el que va dir Kuhn (1970) sobre les revolucions científiques. Kuhn afirma que quan hi ha un vell paradigma, acceptat universalment com una forma rígida i ortodoxa de pensament, i aquest paradigma ja no és capaç de resoldre els problemes amb els quals s'enfronta, es fan esforços heroics per tapar les vies d'aigua del vaixell abans que aquest s'enfonsi –si em permeten de dir-ho de manera metafòrica. Els esforços produeixen resultats interessants, no hi ha cap dubte, però no resolen allò que no es pot resoldre des de dins del vell paradigma. El que cal és “sortir” del sistema –deixar el vaixell– i construir-ne un de nou.

Al llarg dels darrers anys diversos autors han intentat de crear nous models aplicables als éssers vius, tot fugint de les metodologies inherents als sistemes dinàmics newtonians. Podem citar les aportacions de Csanyi (1981, 1982, 1989); la teoria de *l'autopoesi* de Maturana i Varela (1980); la *improgramabilitat estructural* de Conrad (1985); la *immensitat* d'Elsasser (1981), etc., que són representatives de les noves línies de pensament.

Per concretar el que acabo d'exposar i per tal d'exemplificar les idees exposades, em referiré a la resposta que donen tres autors representatius a la pregunta sobre quina és l'organització dels éssers vius.

- Per a Rosen, són *sistemes anticipatoris*.
- Per a Pattee, són *sistemes autointerpretadors de símbols* (o autoinformacionals).
- Per a Kamps, són *sistemes automodificants*.

La informació és un element clau i comú en la concepció de tots aquests sistemes. “Es tracta però d’un nou concepte d’informació, establerta i interpretada de manera autònoma pels éssers vius.” (Fernández i Moreno, 1992).

Segons Rosen (1985), el que caracteritza fonamentalment els éssers vius és la seva capacitat de construir models interns predictius de si mateixos o dels seus entorns i d'utilitzar les prediccions d'aquests models per controlar el seu comportament present. Segons això, els organismes són veritables *sistemes anticipatoris*. Aquest és evidentment un plantejament no newtonià, ja que, en aquests, els canvis presents poden dependre dels estats passats (sistemes amb memòria) i de l'estat present, però mai del futur. Segons aquest model les capacitats emergents dels éssers vius es produeixen com a conseqüència d'una desviació del comportament del sistema respecte a la seva pròpia representació.

Els sistemes *autointerpretadors de símbols* o *autoinformacionals* deriven del reconeixement que en els organismes hi ha un tipus excepcional d'interdependència entre elements dinàmics que canvien en funció del temps, les proteïnes, i elements *simbòlics* o informacionals, l'ADN, el canvi dels quals es pot descriure sense relacionar-lo amb el temps. És el que Pattee (1982) ha denominat “Principi del *tancament semàntic*”. Segons Pattee l'origen de la vida com a fenomen evolutiu seria el resultat de l'aparició de sistemes moleculars amb capacitat d'interpretar els símbols que ells mateixos produeixen. Les cadenes moleculars dels gens només esdevenen representacions simbòliques si els soports físics dels símbols són, en algun moment del procés, directament reconeguts per les molècules traductores (aminoacil-ARNt-sintetasa) que executen accions espe-

cífiques (síntesi proteica). El tancament semàntic esmentat sorgeix quan les molècules traductores són elles mateixes referents de les cadenes de gens. Ja es veu que per explicar els sistemes símbol-matèria fa falta considerar tant els aspectes dinàmics de l'estructura material del sistema (el comportament del qual està descrit per les lleis de la física) com l'aspecte informacional (el comportament del qual està subjecte a regles). Les cadenes simbòliques no signifiquen res si no és que elles mateixes i la dinàmica que comporten incloquin un sistema de tancament semàntic. Segons aquest esquema per a descriure els sistemes vius no ens podem quedar només amb un únic sistema de descripció, –dinàmic o informacional– com fan habitualment les teories desenvolupades fins avui.

Els *sistemes automodificants* de Kampis (1991) es concebeixen com a sistemes basats en components que durant la seva activitat ordinadora van creant i destruint les estructures materials que serveixen com a components bàsics del sistema. Aquests *sistemes de components* tenen dinàmiques creatives, no predictibles. Segons Kampis, els sistemes de components són omnipresents i les seves propietats són radicalment diferents de les dels sistemes estudiats per la física i l'enginyeria. Sempre han estat presents, però la ciència els ha oblidat o en tot cas els ha volgut veure com si no fossin més que sistemes físics complicats. En els sistemes de components, els components –i les seves variables dinàmiques associades– canvien durant els processos. Les variables formen un conjunt complex i, per tant, per a definir-les i decodificar-les necessitaríem el resultat del procés dinàmic. És un problema que només és resoluble si abandonem les idees de causalitat computable i de dinàmica algorítmica. Tals sistemes no poden ser definits o descrits abans que produeixin allò que ha de ser descrit. Mai no podem conèixer el pas següent.

Un sistema de components en abstracte es pot definir per les tres propietats següents:

- a) Hi ha un conjunt finit de components bàsics o de partida, permanents i no divisibles, extrets d'un grup concret.
- b) Hi ha una varietat il·limitada dels diferents tipus admissibles de components, construïts a partir dels components bàsics d'acord amb alguna regla de composició (explícita o implícita).
- c) Els components del sistema són ensamblats i desensamblat pels processos del sistema, de tal manera que es pugui realitzar també qualsevol altre component admissible.

Les regles constructives indicades s'assemblen a les del llenguatge (sobretot si pensem en els llenguatges naturals i no en els formals). Els components de base serien les lletres d'un alfabet; els components, les paraules i les frases, i les regles de composició, la gramàtica. Els processos correspondrien a la lectura i escriptura del text mitjançant operacions de "tallar, enganxar" donada una quantitat fixa de lletres en el moment inicial.

Una propietat important dels sistemes abstractes de components que s'han definit –també característics dels sistemes naturals– és que, en general, hi ha molts més components possibles que no pas components simultàniament representables pel sistema.

Els sistemes de components o automodificants **no poden ser modelitzats computacionalment** perquè poden efectuar a cada pas una modificació en la definició dels seus components que obligaria a un canvi continu del "marc" de descripció: els nous components tenen accés a propietats, fins a aquell moment "ocultes", dels altres. Els fenòmens basats en aquest mode de comportament són bastant comuns en biologia: de manera general els trobem en diversos nivells de l'univers biològic, des de les cèl·lules fins als ecosistemes i els sistemes cognitius.



“El nostre cos és una màquina per a viure.”

**Lleó Tolstoi**  
Guerra i pau

### **3. LA MÀQUINA DE LA VIDA** *Vers les fronteres de la vida artificial*

Els humans, ja des de l'antiguitat, s'han sentit atrets i fascinats pels dispositius i mecanismes que imiten els moviments, les funcions o els actes dels éssers vius. Fer mecanismes animats a través de dispositius hidràulics o mitjançant politges, palanques, cargols, engranatges, lleves i molles, ha estat una constant des de temps antics. Alguns foren ja descrits en les mitologies clàssica i oriental: Dèdal, per exemple, va construir estàtues que es movien soles; Heró d'Alexandria, en el seu *Tractat de pneumàtica*, descriu aus que volen, refilen i beuen. En l'alta Edat Mitjana molts artesans, procedents principalment del gremi dels rellotgers, realitzaren nombrosos autòmats que representaven figures humanes o d'animals “que tenien tota la semblança de moure's com si fossin vius” i capaços, fins i tot, de generar sons. En el Reinaxement, els progressos tecnològics derivats també majoritàriament de l'art de la rellotgeria foren importants: Leonardo da Vinci construï un lleó animat i, posteriorment, aparegueren autòmats de funcionament cíclic governats per tambors amb pues, etc. En el segle XVIII, el francès Vaucanson construï una sèrie de cèlebres autòmats destinats, com la majoria dels de la seva època, a la cort o, eventualment, a servir com a motiu d'atracció a les fires. El famós ànec de Vaucanson (exposat a París el 1738), segons testimonis de l'època, es movia, nedava, aletejava i s'allisava les plomes amb el bec; fins i tot podia beure i,

poc després d'haver-se empassat el menjar que se li oferia, evacua-va una matèria amorfa.

D'ençà de la revolució industrial, el desenvolupament del motor elèctric donà un impuls notable a la realització de mecanismes que han substituït l'ésser humà en nombroses tasques i funcions. Posteriorment, amb l'ajut de l'electrònica i de la informàtica, s'han desenvolupat màquines d'ús general anomenades *robots*. El robot neix de la conjunció d'una estructura mecànica articulada i d'un sistema electrònic de comandament, en el qual s'integra normalment un computador. Aquesta disposició que permet la programació i el control dels moviments a realitzar pel sistema, i també la memorització de les diverses seqüències de moviments o de tasques, confereix una gran flexibilitat al robot i en possibilita l'adaptació a tasques i actuacions molt variades i diverses en funció del programa executat i dels elements terminals o eines emprades.

Els progressos efectuats recentment en el camp de la *intel·ligència artificial*, de l'*aprenentatge* i del *reconeixement de formes*, obren noves perspectives en permetre que els robots rebin informació de l'entorn i ajustin el seu funcionament a la tasca a efectuar, sense intervenció humana...

La robòtica moderna ha fet molts progressos. Actualment s'aplica també en l'àmbit mèdic: ajudant aquelles persones que pateixen disfuncions importants en els membres, assistint els metges en certes formes de cirurgia, o en les tasques de manteniment dels malalts en els hospitals.

Tot el que acabo d'exposar, en el fons, no és més que reflex del desig soterrat en el subconscient dels humans de ser com déus i de poder crear vida. En un nou pas endavant i com a renovada síndrome de Frankenstein, aquest desig dóna ara pas a una nova ciència: la de la anomenada *vida artificial*. Podríem dir, metafòricament parlant, que, als intents d'imitar o de substituir els moviments o les

funcions del cos –la nostra *màquina per a viure*, segons frase de Tolstoi–, s’hi afegeix ara l’intent de descobrir i fins i tot crear la *màquina de la vida*, que ens ha d’obrir les portes de noves concepcions de vida artificialment creada...

### **3.1. La biorrobòtica al servei de la nostra “màquina per a viure”**

Hem parlat de la relació que es pot establir entre la robòtica i nosaltres mateixos –la nostra “màquina per a viure”– per tal de substituir, complementar o potenciar les nostres capacitats o per suplir a compensar les nostres mancances o disfuncions. Els sistemes robotitzats d’*atenció hospitalària*, la *telepresència* –telemanipulació quirúrgica– la *cirurgia robotitzada* o la *robòtica rehabilitativa* en són exemples representatius. En efecte, la *robòtica mèdica* posa al nostre abast tota una sèrie de tècniques, dispositius i sistemes que permeten incrementar la capacitat operativa de l’ésser humà o trobar remei a moltes de les seves alteracions orgàniques o funcionals. En la conferència europea sobre robòtica mèdica (Robomed ’94), celebrada recentment a Barcelona, es van presentar molts treballs directament relacionats amb els temes esmentats. Així mateix, en un treball signat per Preising, Hsia i Mittelstadt (1991), es passa revista a les aplicacions dels robots en el camp mèdic.

La *biorrobòtica* (Ferraté, 1983), en particular, ocupa l’ampli camp dels sistemes mixtos en els quals s’estableix la cooperació o simbiosi entre un individu –l’operador humà– i un dispositiu artificial o tecnològic –la “màquina”–, a fi d’ajudar a aquell a superar les seves deficiències, tant si són congènites com si són adquirides. Aquesta associació pot prendre diverses formes i modalitats i inclou, per exemple, les pròtesis i les ortesis, la manipulació robòtica interactiva, els òrgans artificials, els sistemes de percepció artificial i els de substitució sensorial, etc. així com també tota mena de transductors, captadors i mesuradors...

Si analitzem els sistemes biològics des d'un punt de vista cibernètic, veurem que, són *sistemes tancats* –amb realimentació o *feedback*– a molts nivells. L'objectiu dels sistemes de realimentació, expressat de forma senzilla, consisteix a mantenir una variable o un conjunt de variables dins uns marges de valors prescrits, amb independència de les pertorbacions exteriors o dels canvis d'estat interns que tendeixen a portar el sistema fora dels límits d'actuació acceptables. És l'acció típica de l'homedòstasi en la qual el mesurament del senyal de sortida –l'acció– s'utilitza per influir en el senyal d'entrada –la reacció– i mantenir la sortida en el valor desitjat.

Si considerem ara la interrelació entre l'operador humà i el seu entorn, i distingim entre els senyals d'acció i de reacció esmentats, podrem constatar que, en general, l'acció comporta la *circulació d'energia* (per moure un òrgan, manipular un objecte, etc.) i la reacció implica la *transmissió d'informació* (per determinar o mesurar la posició, la velocitat, l'estat, etc. de l'ens controlat).

### 3.1.1. Formes d'interacció

Quan en l'individu es donen discapacitats o mancances orgàniques (funcionals o sensorials) podem actuar sobre el camí d'acció (o energètic), o sobre el de reacció o retorn (mesurament/informació).

En el primer cas –*actuació sobre l'acció*– hi ha dues alternatives:

- ***Substituir o complementar l'òrgan anatòmic:*** pròtesi, ortesi, vàlvula cardíaca, etc.
- ***Substituir la funció de l'òrgan anatòmic*** i no la seva anatomia: *manipulació robòtica*. En aquest cas el dispositiu de manipulació no pretén ser una part del cos de l'usuari i no necessita estar en contacte físic amb aquest.

En el segon cas –*actuació sobre el retorn*– es pot incidir, segons el cas particular de què es tracti, sobre diversos tipus de senyals i canals d'informació:

- ***Retorn sensorial suplementari***: per mitjà d'exteroceptors o detectors externs de pressió, posició, temperatura, etc. que donen informació complementària que normalment és transmesa sensorialment a l'operador.
- ***Substitució sensorial***: per mitjà de pell artificial, implantacions coclears, biosensors, etc.
- ***Percepció artificial***: per mitjà de sistemes de tractament d'informació espàcio-temporal complexa de tipus visual, auditiu, etc.

Quan el sistema robòtic interacciona amb l'usuari per mitjà de la informació que aquell genera sobre el seu estat, condicions, moviments –la seva situació en l'entorn–, es tracta del que s'anomena la *robòtica interactiva*. Això és molt convenient, perquè els entorns humans són molt menys estructurats i permanents que els espais de treball típics de la robòtica industrial.

La *comunicació* entre l'operador humà i el manipulador robòtic pot ser de característiques i modalitats diverses:

- Segons el ***tipus***: per *programa* –fora de línia– i per *ordre* –en línia–.
- Segons el ***mode***: per *guiatge* (acció homomòrfica, teleoperació o biocontrol) i per *sentències* (textuals o orals).
- Segons el ***nivell***: per l'*especificació d'operacions* –forma explícita– o per la *descripció d'objectius* –forma implícita–.

Els sistemes de cooperació persona-robot poden arribar a ser força complicats. L'assoliment d'un funcionament *sinèrgic* implica posar a punt i integrar dins un sistema, entre d'altres, tècniques diverses d'intel·ligència artificial, d'aprenentatge, de planificació i de reconeixement de formes. S'està encara molt lluny d'haver resolt –o fins i tot definit– els problemes que comporta el funcionament sinèrgic. Es calcula que els desenvolupaments continuaran encara al llarg de bastantes desenes d'anys, durant els quals s'aniran perfeccionant i refinant aquests mètodes de funcionament cooperatiu (Pin i altres, 1992).

### 3.1.2. Dels somnis a la realitat

El desenvolupament d'aquests sistemes depèn fortament de la possibilitat de trobar mètodes eficients i fiables per suplir la capacitat *exteroceptiva* o *propioceptiva* dels éssers humans, i també de descobrir nous mètodes d'actuació mecànica de més gran rendiment energètic, rapidesa de resposta i facilitat de control.

Els progressos importants que es fan en el camp de la microinformàtica possibiliten cada cop més la realització de sistemes de control i de tractament de la informació veritablement flexibles i potents. D'altra banda, el desenvolupament de nous dispositius *micromecànics* (Becker i altres, 1986; Menz i Buess, 1993), i el de mètodes que permeten accedir a neurones individuals o a grups de neurones, obrirà les portes a noves formes d'acoblament i interacció entre la màquina i l'ésser humà.

Aquesta última és precisament una de les àrees de treball que presenten més dificultats i que encara no estan plenament resoltes. El Centre Nacional de Microelectrònica, al campus de Bellaterra, per exemple, treballa en un projecte d'aquest estil. L'objectiu és aconseguir connectar de manera permanent i repetible amb el sistema nerviós perifèric per tal de poder accionar i codificar el senyal

nerviós per poder-lo processar posteriorment. El mètode emprat es basa en l'ús de plaquetes de silici amb microperforacions metal·litzades que han de ser travessades de manera natural pels axons dels nervis. La plaqueta, amb un gruix entre un i dos microns, es col·loca a l'extrem distal del nervi seccionat.

### **3.2. Abast i límits de la *vida artificial***

Hem vist que l'organització de la vida no pot ser modelitzada per mitjà de sistemes dinàmics, per complexes que siguin, ni emprant sistemes computacionals, perquè ambdós són, finalment, deterministes. Qualsevol intent de crear artificialment vida, veritable vida, per medi de procediments mecanicistes és, per tant, pura utopia. No hem d'oblidar que per perfecte que sigui un model i per acurada que sigui la semblança del seu funcionament amb el d'un ens o fenomen real, no els podem identificar. Una *màquina de la vida*, entesa com un intent de simulació o de descripció de la vida mateixa, no pot ser confosa amb aquesta última. Copiar de veritat quelcom pressuposa el seu estudi aprofundit i la seva posterior "construcció", de manera que alhora es respectin o dupliquin la funcionalitat, d'una banda, i l'estructura i la materialitat corresponents, de l'altra banda. Qualsevol model que no impliqui una exacta i precisa duplicació material, estructural i funcional de l'original, només és vàlid com a tal en un marge restringit i acotat de condicions d'entorn i de funcionament.

Malgrat el que acabo d'exposar es fan grans esforços per desvelar els misteris de la vida i explicar-ne –almenys parcialment– les seves característiques i particularitats per mitjà de models. Des de fa pocs anys s'estan desenvolupant tota una sèrie de tècniques, bàsicament informàtiques, dedicades a simular l'existència "d'éssers" capaços d'organitzar-se, d'adaptar-se a l'entorn i de comportar-se seguint unes lleis similars a les de l'evolució natural i la vida. Aquestes tècniques i metodologies s'apleguen sota una nova disciplina que es coneix amb el nom de *vida artificial*.

La primera reunió internacional sobre vida artificial va tenir lloc l'any 1987 i es va presentar com una trobada interdisciplinària sobre síntesi i evolució dels sistemes vivents (Alife I). La vida artificial s'ha definit (Langton, 1989) com:

“[...] l'estudi de sistemes construïts per l'home que exhibeixen comportaments característics dels sistemes vius naturals”.

La vida artificial constitueix una branca de l'anomenada *ciència de la complexitat* que estudia els sistemes naturals capaços de desafiar el caos de l'entorn i de generar estructures ordenades més o menys complexes. En el fons d'aquesta nova ciència hi ha la presumpció de considerar la vida artificial en la frontera que separa l'ordre del caos i la vida com una propietat emergent dels sistemes autoorganitzats.

Entre l'ampli espectre de treballs que s'han publicat recentment en relació amb la vida artificial, podem diferenciar clarament tres maneres essencialment diferents de concebre aquest concepte (Fernández i Moreno, 1992):

1. Treballs que consideren la vida artificial com una ampliació a universos formals de l'àmbit d'aplicació de les ciències biològiques.
2. Treballs que consideren –i utilitzen– la vida artificial com una metodologia –mitjançant la simulació o la modelització– vàlida per a l'estudi dels organismes naturals.
3. Treballs que consideren la vida artificial com una via per aconseguir organismes artificials en el mateix univers en què existeixen els naturals.

Expressat d'una altra manera podriem dir que la vida artificial, segons l'àmbit que adoptem per a la seva concepció, estudi de propietats o realització, es pot formular en:

- Universos formals.
- Universos simulats.
- Universos materials.

La vida artificial, tot i que oficialment només compta amb molt pocs anys d'existència, ha aconseguit ja desenvolupar resultats més o menys espectaculars, no solament en el terreny de les simulacions sinó també en el de les realitzacions. Els seus potencials han estat emprats també en el camp de l'art generat per ordinador per tal de produir artificialment mons fantàstics, evolutius i amb "vida", que recreen universos irrealment, d'aparença biològica, mitjançant imatges i seqüències fortament impactants pel seu nivell imaginatiu i de novetat (Sims, 1993).

### **3.3. La vida artificial com a concepció formal**

Els treballs que se situen en el grup 1 descrit més amunt pressuposen que el que caracteritza un ésser viu és precisament el seu caràcter computacional i que les propietats derivades de la seva materialitat són contingents i no tenen importància real. A partir d'aquestes premisses –o sia, del fet de considerar que l'ésser viu és essencialment un computador–, si som capaços de definir sistemes computacionals en diversos universos formals, podrem estendre el concepte de biologia –via la vida artificial– de manera que abasti una definició més universal de la vida. En altres paraules, haurem ampliat la biologia a universos computacionals!

Òbviament, les premisses anteriors estan en contradicció amb la tesi sostinguda en aquest treball segons la qual el que caracteritza un ésser viu depèn tant de la seva organització o part formal, com de la seva estructura o part material. Això no vol dir que d'aquesta concepció de la vida artificial no es puguin derivar conseqüències interessants per les seves aplicacions o per a la comprensió de determinats aspectes o fenòmens de la vida mateixa.

Alguns dels sistemes que podem considerar que formen part d'aquest grup d'universos "computacionalment vius" deriven dels *autòmats cel·lulars* que va formular von Neumann en el curs del seu va intent de trobar el *constructor universal* –com a superació de la màquina de Turing–, que havia de ser no solament capaç de computar, és a dir, de tractar elements lògics segons un programa o algorisme, sinó també de tractar amb elements materials. Von Neumann, en el seu famós treball *Theory of Self Reproducing Automata* (1951 i 1966), va ser el primer en preguntar-se si una màquina es podia reproduir a si mateixa, i, si bé va abandonar finalment la idea de *màquina autoreproductora* o *kinematon*, per a la qual cosa era necessari l'inabordable *constructor universal*, es va centrar en els aspectes formals d'aquella mitjançant la teoria dels autòmats cel·lulars.

Els *autòmats cel·lulars* es defineixen com a xarxes d'autòmats simples –cèl·lules–, connectats localment entre ells, que intercanvien senyals de sortida i d'entrada, i que en el procés modifiquen el seu estat segons una funció de transició. Segons aquesta definició l'estat d'una cèl·lula en un moment determinat –generació– depèn únicament i exclusiva dels estats de les cèl·lules veïnes i del seu propi estat en el moment precedent –generació anterior– i queda determinat per la funció de transició esmentada.

Els autòmats cel·lulars són eines molt útils per modelitzar fenòmens molt diversos de l'univers (Margolus i Toffoli, 1987) i en particular, tal com s'ha indicat més amunt, s'han emprat en nombroses ocasions per simular el fenomen de la vida. Una de les realitzacions més conegudes i senzilles, es la que el matemàtic John Horton Conway va denominar "joc de la vida" (Berlekamp i altres, 1983). Concebuda per a autòmats cel·lulars amb dos estats per cèl·lula, genera configuracions finals estables, periòdiques o no periòdiques, i va ser molt popular els anys setanta.

Una simulació més evolucionada que l'anterior és la proposada per Gleick (1991), qui, sota l'epígraf de *Toy Universes*, presenta

quatre famílies d'autòmats cel·lulars que disposen de molts més estats que el del "joc de la vida". Aquests autòmats, amb els paràmetres degudament ajustats, evolucionen dinàmicament generant gràfics de colors contínuament canviants en forma de dobles volutes o espirals, d'una estranya aparença orgànica. Aquestes volutes es denominen volutes BZ en memòria dels químics soviètics Beluzov i Zhabotinsky, els quals les van observar en determinades reaccions químiques. Així mateix, el biòleg Winfree (1974) va conjecturar que les volutes OZ eren similars als fronts d'ona de l'excitació que manté el batec del cor.

### 3.3.1. Els autòmats autoreproductors

Un pas endavant en la progressió que estem veient, la presenten els intents de realització d'autòmats autoreproductors en el camp formal dels autòmats cel·lulars. Al començament d'aquest apartat ja he fet algunes consideracions sobre els treballs i esforços de von Neumann en relació amb el *constructor universal*, que hauria d'haver estat un aparell capaç d'ensamblar peces que es trobarien al seu entorn, fins a reproduir qualsevol màquina predefinida (descrita per una sèrie d'instruccions). L'elucubració de von Neumann sembla genial: obtingut el constructor universal només faltaria donar a aquesta màquina una descripció de si mateixa per obtenir un *procés d'autoreproducció!* La característica essencial d'aquest procés és que la descripció de la màquina ha de ser utilitzada de dues maneres diferents. En primer lloc, la descripció de la futura màquina ha de ser llegida i *interpretada* per la màquina existent –el constructor universal– per produir-ne la rèplica. En segon lloc, un cop construïda la còpia se l'ha de dotar també de la seva pròpia descripció –idèntica a la de la màquina original– que, en aquest cas, *no ha de ser interpretada* sinó solament *copiada*. Observem que von Neumann, en aquest procés, introdueix la distinció entre els aspectes *sintàctics* –ininterpretats– i *semàntics* –interpretats– de la informació relativa a l'autòmat.

És interessant de fer observar que la parella informació interpretada/informació ininterpretada (sintàctica/semàntica) es troba també en la reproducció natural de les cèl·lules vives. Les instruccions interpretades es corresponen amb el procés de *traducció* de l'ADN a proteïnes, mentre que el mode ininterpretat correspon al procés de transcripció que duplica la informació genètica mitjançant síntesi de missatgers ARN (mARN) i duplicació de l'ADN.

Cal destacar que von Neumann va descobrir aquests mecanismes abans que es reconegués el codi genètic i que s'explorés la màquina molecular de la cèl·lula! Aquest és un resultat remarcable, i el fet de la forta similitud entre els dos processos ha induït alguns a pensar que una construcció com la de von Neumann pot revelar els secrets de la vida en termes matemàtics. Vana il·lusió!

### **3.3.2. De la utopia a la realitat**

La idea de von Neumann era interpretar la descripció del sistema autoreproductor des de dins mateix d'aquest i reproduir així mateix l'interpretador. En altres paraules, ni més ni menys que simular i reproduir alhora la màquina en la qual s'efectua la reproducció! Aquesta era realment una idea revolucionària que molts estudiosos actuals de la replicació no acaben de comprendre del tot. En efecte, quan fem una modelització matemàtica o una simulació per computador introduïm un tercer element: fem descripcions dirigides a algú o orientades a quelcom; descripcions que han de ser interpretades externament per una màquina que no és ni descrita ni reproduïda!

Fins i tot, si prescindim d'una modelització matemàtica o d'una simulació externa per computador, el sistema de von Neumann deixa de ser aplicable si l'interpretador intern es materialitza per mitjà d'un computador. Això és degut al fet que, com ja hem vist amb anterioritat, és impossible l'autosimulació completa d'un sistema computable (és una derivació del teorema de Gödel). Per tant, també és impossible la seva autoreproducció.

Referint-me ara novament a la similitud entre l'organització dels mecanismes autoreproductors de la màquina de von Neumann i els de la cèl·lula, que ha donat peu a les disquisicions precedents per intentar de rebatre la creença que és possible desvelar matemàticament o formalment els secrets de la vida, em plantejo la següent pregunta: no és una mica ingenu i simplista concebre els gens exclusivament com a "descripcions", basant-nos en la seva semblança superficial amb la part corresponent de la màquina de von Neumann?

\* \* \*

Deixant de banda les reflexions anteriors, que són de caire gairebé filosòfic, hem d'indicar que hi ha hagut intents diversos de "construir" màquines de von Neumann. Von Neumann mateix va ser capaç d'obtenir una realització del seu sistema per mitjà d'una xarxa bidimensional d'autòmats cel·lulars de vin-i-nou estats per cèl·lula, amb una funció de connexió senzilla en la qual l'estat futur de cada cèl·lula depèn del de si mateixa i del de les quatre veïnes (a dalt, a baix, a l'esquerra, a la dreta).

Recentment, Langton (1989) ha dissenyat un autòmat "autoreproductor" més senzill que el de von Neumann, que no precisa la capacitat de constructor universal, ja que la seva descripció no està donada estàticament sinó de manera dinàmica en un circuit en anell que es repeteix una vegada i una altra. L'autòmat de Langton, descrit com una doble membrana que engloba una molècula d'ADN, està compost per un camp en forma de Q, de 10 x 15 cèl·lules, cada una de les quals pot prendre vuit valors diferents. La definició de l'autòmat i la seva descripció són donades per una funció de transició especificada en una taula juntament amb els valors inicials de les diferents cèl·lules que el conformen. En el fons aquest autòmat no és sinó una versió amb una funció de transició més complicada que la corresponent al "joc de la vida", anteriorment descrit. Tots aquests sistemes continuen confonent els conceptes de reproducció

trivial o transcripció, amb el de reproducció informacional o traducció. No es veu cap argument que permeti defensar, per exemple, que les configuracions inicials d'un conjunt de cèl·lules són la descripció –a interpretar o traduir posteriorment com si es tractés d'un codi genètic– del conjunt format per les 10 x 15 cèl·lules.

### 3.3.3. L'autopoesi

La teoria de *l'autopoesi*, en quant és subjecte de simulació computacional, forma també part de la interpretació formal de la vida artificial. L'autopoesi, que pretén ser una teoria general de la vida i del món cognitiu, fou desenvolupada per Maturana i Varela (1973 i 1980). Un *sistema autopoètic* es pot definir com una xarxa tancada de processos productors –metabolitzadors– de components, i entra dins la categoria de fenòmens autoreferencials. Per tant, no li són aplicables els llenguatges dels sistemes formals o computables tradicionals, ja que, per la seva construcció mateixa, exclouen les declaracions o afirmacions autoreferencials, és a dir, allò sobre el qual opera un algorisme i allò que efectua materialment la operació estan clarament separats. No passa el mateix, en canvi, en el codi genètic, que està escrit en el codi genètic mateix!

Segons Maturana i Varela l'autopoesi involucra una forma diferent d'existència i un tipus nou de lògica. La lògica lineal de causa-efecte dels sistemes causals ja no li és aplicable. Afinant més la definició donada més amunt podem dir que el que caracteritza una organització autopoètica és ser una xarxa de transformacions dinàmiques que produeixen –metabolitzen– els seus propis components i que fan possible l'existència d'una vora –membrana– que és alhora la condició perquè pugui operar la xarxa de transformacions que l'han produït com a unitat (Maturana i Varela, 1990). Les capacitats evolutives i reproductives no s'inclouen en la definició dels elements de l'organització de l'ésser viu i són més aviat el resultat de l'aplicació d'aquesta organització sobre un espai definit pel sistema mateix.

L'autopoètica, malgrat que ha despertat un gran interès i té força seguidors, em sembla una elucubració teoritzant, estèril i, en el fons, trivial, encara que se li pot reconèixer solidesa conceptual. El fet que en l'autopoesi la identitat del sistema estigui donada per la seva organització, és a dir, per les propietats relacionals dels seus components i no per la seva estructura o conjunt de propietats materials, que considera contingents respecte de l'anterior, dóna a aquella un caràcter marcadament formal i la desvincula del domini d'aplicació de l'organització que defineix –del seu univers–. En el nucli d'aquestes dificultats es troba el fet que l'autoreferència s'assumeix com un estat de fet que no necessita explicació, o pel qual no es poden trobar explicacions referides a altres elements. La qual cosa, finalment, no explica res!

En els models computacionals de sistemes autopoètics (que ja no són autopoètics sinó *alopoètics*) es defineix un univers abstracte amb una sèrie d'elements que s'hi poden moure aleatòriament, i es donen regles de composició/descomposició i d'unió/separació.

### **3.3.4. Els biomòrfs**

Una altra línia de treball que ha estat fèrtil en realitzacions –algorismes i simulacions–, en el sentit d'estendre el concepte de biologia a mons formals de vida artificial, és la que deriva de crear de forma explícita models computacionals del gen.

Hi ha un debat no acabat sobre la naturalesa de les unitats biològiques. Un dels més conspicus contribuïdors a aquest debat és R. Dawkins (1976 i 1986). Dawkins sosté que és el gen individual que actua com a objecte final en biologia. Aquest punt de vista és compartit per la majoria dels genetistes, que el tracten com una variable autònoma. Ara bé, s'ha d'admetre que l'actuació del gen depèn del context, ja que només és funcional en el genoma. A més, moltes característiques són codificades per més d'un gen, per gens que es recobreixen o, fins i tot, per gens codependents.

El mateix Dawkins (1986), per citar un exemple, presenta un programa titulat BW (*Blind Watchmaker*), en el qual es generen el que Dawkins anomena *biomorfs*, a partir d'un conjunt de regles que es presenten a l'usuari com els valors d'un "genoma" amb quinze gens. Cada "gen" del genoma pot prendre una sèrie de valors i té una funció determinada en la configuració que prendrà el biomorf corresponent. Fins i tot, en alguns casos, els canvis observats són funció dels valors combinats de diversos gens. Hi ha gens per controlar, entre altres característiques, les dimensions horitzontals i verticals, el nombre de ramificacions i el de segments, així com també la distància entre aquests, les simetries bilateral i radial, etc. També es poden regular la capacitat de mutació dels valors dels gens i la seva probabilitat... El programa permet fer una espècie d'enginyeria genètica, crear diverses progènies i dibuixar els corresponents arbres evolutius. Tot molt bonic i espectacular, però tan bonic i espectacular com trivial i irrellevant! A la simulació, tota la informació rellevant està en els valors del genoma de cada biomorf; a la realitat –els sistemes biològics reals– l'expressió fenotípica ho és tot menys lineal.

Aquesta mena de processos, artificialment interpretats, poden servir per il·lustrar i valorar veritats conegudes com podrien ser, per exemple, la funció del ritme de mutacions o altres aspectes, però en cap cas són útils per modelar l'evolució explicant les seves passes o la forma com procedeix.

### **3.4. La vida artificial com a metodologia**

Sota aquest epígraf s'inclouen els treballs que aborden el camp de la vida artificial des d'una aproximació metodològica, com una eina de simulació o modelització dels diversos processos emergents que caracteritzen l'evolució i el comportament dels éssers vius. En aquests treballs s'utilitza el computador per a simular processos evolutius, cognitius o autoorganitzatius molt diversos i, en general,

tot el que deriva de l'autonomia dels éssers vius. No crec que faci falta insistir novament que la simulació per mitjà de computador o de sistemes algorísmics no pot modelitzar la veritable naturalesa dels éssers vius, caracteritzats per la imbricació i interrelació profundes entre organització i estructura que els caracteritza. Nogensmenys, cal admetre que molts d'aquests treballs faciliten una visió més aprofundida d'alguns aspectes dels fenòmens estudiats, i, fins i tot, serveixen de base per a ulteriors aplicacions en el camp de la tecnologia, de l'enginyeria biomèdica, o de la intel·ligència artificial.

La realització de dispositius que imiten o simulen comportaments típics dels éssers vius té ja una llarga tradició. Alguns són molt coneguts i es pot dir que s'han convertit en peces clàssiques de la història de la cibernetica. Recordem, per exemple, entre els precursors, l'homedstat d'Ashby (1954) que és aproximadament una mena de computador analògic format per quatre unitats interconnectades de tal forma que li donen la capacitat d'aconseguir una gran estabilitat del sistema front a les pertorbacions externes. Altres realitzacions clàssiques, anteriors a la utilització dels computadors, són les de Grey Walter (1951), com ara la *Machina Speculatrix*, que era un mòbil amb forma de tortuga. Aquesta, amb dos sensors, l'un de contacte i l'altre fotoelèctric, era capaç de desplaçar-se i de generar maniobres *ad-hoc* per tal d'evitar el xoc amb determinats obstacles. Les "tortugues" també eren capaces de buscar un endoll per "alimentar-se" quan la càrrega de les bateries havia disminuït...

La *Machina Speculatrix* és una predecessora dels "Vehicles" de Braitenberg (1985). Braitenberg ha creat un petit "món de joguines" per explicar comportaments biològics que abasten des de reaccions instintives fins a processos d'evolució per variació i selecció. Alguns d'aquests vehicles, que comencen a ser clàssics dins l'àmbit de la vida artificial, consisteixen en sistemes senso-motrius que es desplacen en un entorn -camp de forces- en què existeixen fonts d'atracció i de repulsió.

També s'han realitzat intents d'imitar el comportament dels insectes. El projecte "insecte artificial" de Beer (1990) tracta d'explorar la utilització de *neurons artificials* per dissenyar un sistema nerviós artificial que controli el funcionament d'agents autònoms. Aquest projecte és una abstracció computacional d'un insecte biològic amb tòrax-abdomen, sis potes, dues antenes i una boca. Les antenes i les potes tenen sensors tàctils i químics. El "metabolisme" està representat per un nivell fix de consum d'energia. El "sistema nerviós" de l'insecte s'organitza en petites xarxes de neurones modelitzades també per computador. L'insecte és capaç de desenvolupar diferents modes de comportament en la seva interacció amb el medi, resolent fins i tot conflictes entre diferents sol·licitacions internes i externes.

Aquests treballs tenen un interès limitat des del punt de vista de la vida artificial, ja que, si bé descriuen comportaments dels éssers vius en relació amb el medi, no plantegen problemes com els de la identitat o l'autonomia de l'organisme. Per bé que alguns autors creuen que el veritable objectiu de la vida artificial és intentar reproduir, ja des de l'inici, el comportament global dels éssers vius, incloent aspectes com l'autoreproducció i l'evolució, d'altres (Brooks, 1986) estimen que és millor emprar una estratègia progressiva, començant per comportaments molt senzills i anar afegint-ne de nous sobre els ja existents, mirant de resoldre els conflictes que puguin aparèixer entre els antics i els que s'han afegit.

Permeteu-me ara novament de ser una mica crític sobre els models presentats. Ja m'he referit a la profunda implicació entre les propietats de l'organització i les de l'estructura dels "components" biològics i cognitius dels éssers vius. Atès que els models que es proposen avui en dia en la biologia matemàtica i en les ciències cognitives parteixen de la base que els seus components es poden definir explícitament o generar algorísmicament, els sistemes evolutius resultants no poden diferenciar realment el canvi ordinari de l'evolució —que obeeix lleis diferents— ni la computació de la cognició —que també segueix

lleis diferents—. Això porta molts autors a afirmar optimícticament que els computadors pensen i els sistemes evolucionen!

La “novetat” evolutiva d’estructures com els autòmats cel·lulars (von Neumann, 1966; Myhill, 1964) o els organismes artificials (Laing, 1989) està associada amb un desplegament explícit de regles que preexisteixen sota la forma de definicions implícites de tipus algorísmic. L’aproximació algorísmica només té sentit si les regles definidores de propietats dels nous “components” biològics o cognitius són pre-donats d’una manera o una altra. En aquests processos l’experimentador actua con un déu qui, amb anterioritat, “arranja” les coses al seu gust i voluntat. Això porta a una típica situació en la qual el científic, probablement després de grans esforços, “crea” un sistema la mar d’intel·ligent, que funciona i que fa tot allò que estava previst que fes... i res més!

Tots aquests models i totes aquestes tècniques de simulació no tenen res a veure amb l’evolució. Tal com diu Kampis (1991):

“L’evolució és creativa, aquests [models] són deterministes. L’evolució és semiòtica; aquests són sintàctics. L’evolució és autònoma; aquests són dirigits.”

### **3.5. La vida artificial com a realització material**

Fins aquí hem explorat els aspectes de la vida artificial que compten amb més adeptes en el món de la recerca. Això potser és degut a allò que suposa d’estímul intel·lectual el fet de poder imaginar noves formes de vida que es desenvolupen en ecosistemes nous i trenquen amb les concepcions establertes en el món de la biologia: la vida tal com podria ser en altres àmbits —o en el món de les computadores—, amb totes les limitacions que això suposa, però també amb la facilitat que implica poder fer les experiències en el camp de l’algorísmica o en el de l’univers computacional.

Hem indicat més amunt que existeix una tercera via d'aproximació al problema de la vida artificial: la *realització material* de nous organismes o sistemes que presentin característiques pròpies de la vida. S'està encara molt lluny de realitzar sistemes artificials que repliquin el funcionament i les característiques dels sistemes biològics naturals complexos, però hi ha una cosa que sí que és clara: aquest és l'únic camí que ens pot eventualment portar a resultats interessants i que no siguin merament elucubracions –complicades sí, però conceptualment trivials– en universos formals o formalitzables. La diferència prové del fet que en les realitzacions materials podem disposar, –almenys en principi– de la complexitat d'ordre superior que deriva de considerar alhora les propietats organitzacionals i estructurals de la seva materialitat específica.

Si bé encara no existeix un cos de doctrina consolidat que ens permeti classificar d'una manera sistemàtica i universalment acceptada els treballs que s'efectuen en el camp de la vida artificial, entesa com a construcció o realització materials de nous organismes, crec adequat distingir-los atenent a la seva estructura material, que és la que, en íntima relació amb la corresponent organització, els pot dotar de les seves característiques funcionals més definitòries. Així, doncs, en funció de la complexitat creixent del seu suport, distingirem tres grans grups en *l'univers material* de la vida artificial:

- 1) **Sistemes abiòtics:** es basen essencialment en elements i materials de l'àmbit de l'enginyeria (mecànics, electrònics, etc.). Són parcialment autònoms i estan dotats de capacitat "d'adaptació sintàctica" a l'entorn real. No presenten característiques evolutives ni reproductives.
- 2) **Sistemes pre-biòtics:** la composició química i molecular els permet ser autònoms i que tinguin capacitat d'autoorganització.

3) **Sistemes biòtics:** basats en components orgànics idèntics o similars als dels éssers vius naturals. Són autònoms i tenen capacitat d'autoorganització i d'autoreproducció.

Cal notar que les fronteres entre els grups indicats no són sempre clares i definides. Els sensors tàctils de Conrad (Casti, 1987), que són sistemes biològics estructuralment no programables que utilitzen la capacitat de reconeixement de formes dels enzims per captar patrons lluminosos i transformar-los en senyals d'entrada a sistemes de computació, en són un exemple. Els sensors adaptatius electroquímics de Pask (1961) en podrien ser un altre.

### 3.5.1. Els robots autònoms

Gairebé tots els treballs sobre realitzacions abiòtiques en el camp de la vida artificial se situen en l'àmbit de la robòtica. En el límit, un sistema robòtic es pot considerar com un sistema físic dotat de mobilitat, capaç de rebre informació i d'interpretar el seu entorn mitjançant models, i que pot generar i executar plans d'actuació així com també controlar i supervisar el desenvolupament d'aquests en funció dels objectius a assolir (Ferraté, 1992).

En els treballs sobre vida artificial es desenvolupen robots autònoms que són característics pel que fa a *morfologia* i *comportament*, ja que aquests són aspectes importants a l'hora de concebre sistemes que imitin o emulin l'actuació dels éssers vius.

Atenent a la seva morfologia podem agrupar els robots en cinc tipus principals: *poliarticulats*, *mòbils*, *androides*, *zoomòrfics* i *híbrids*. Sota la denominació de poliarticulats s'agrupen robots de formes molt diverses –normalment sedentaris– amb escassa incidència en l'àmbit de la vida artificial. Els poliarticulats inclouen els robots manipuladors –els robots industrials clàssics– i són els emprats usualment en l'ajut a minusvàlids i en l'assistència mèdica i hospitalà-

ria. Els robot mòbils i els robots zoomòrfics –principalment els exàpodes– són els més citats en la bibliografia referent a la vida artificial.

Tots aquests robots van sempre associats a patrons de funcionament que pretenen emular molt diversos comportaments autònoms dels éssers vius. El problema es presenta en pretendre que les nostres creacions emulin precisament els comportaments *bàsics* dels éssers vius, com ara *l'automanteniment* i *l'autoreproducció*, que són inabastables a causa de la impossibilitat d'autoreconstrucció física dels sistemes realitzats. El problema radica, un cop més, en el fet que, a partir dels materials abiòtics utilitzats per a la construcció dels robots (materials de l'àmbit de l'enginyeria), és impossible codificar part de la seva organització en la seva estructura material mateixa... Novament, ens trobem que la independència entre l'organització i la materialitat limita o impossibilita la capacitat d'automodificació estructural i, per tant, la vertadera autonomia dels robots.

El que sí saben fer aquests robots és adaptar-se de manera flexible a situacions imprevistes, basant-se en la seva experiència i l'actuació passada. Com assenyala Cariani (en Langton i altres 1991) es tracta de sistemes *sintàcticament adaptatius* que poden modificar la seva sintaxi computacional.

Un dels exemples més representatius de la modalitat de sistemes de vida artificial abiòtica de què estem tractant és *Attila*, un robot zoomòrfic de tipus exàpode, realitzat per Brooks. Tal com el seu mateix autor el descriu (en Meyer i Wilson, 1991) es tracta d'un sistema molt complex amb sis potes (cada una de les quals té tres graus de llibertat), equipat amb un sensor de xoc, un cap estabilitzat giroscòpicament i dotat de telemetria, deu microprocessadors i més de cent cinquanta sensors...

El comportament d'*Attila*, quan vaga per un entorn "natural" que no ha estat especialment estructurat ni pensat per a ell, s'assembla

molt a la típica resposta locomotoro-cognitiva de molts animals inferiors, com ara alguns insectes. Quan *Attila* intenta començar el seu periple, no sap caminar. A poc a poc, després de diversos intents infructuosos, en va aprenent: primer en un entorn pla i, posteriorment, fins i tot superant obstacles diversos... L'adquisició del comportament locomotor (que implica la coordinació de les potes, que estan controlades independentment) per mitjà de mètodes d'assaig-i-error és representatiu dels processos d'aprenentatge de molts d'aquests "organismes" artificials.

Per posar exemples de realitzacions més properes a nosaltres, ens podem referir als robots mòbils *ANT* (*Autonomous Navigator Troup*) desenvolupats per Amat i el seu equip a la Facultat d'Informàtica (Amat i altres, 1995), que aprenen a circular en un entorn real, defugint els obstacles, i que són capaços de transmetre "l'experiència" adquirida i el seu coneixement de l'entorn a un altre "company" quan es troben pel camí, per tal de fer plànols de forma cooperativa...

Malgrat que aquests darrers treballs enllacen i es relacionen amb els de Braitenberg sobre vehicles i els de Beer sobre insectes –que hem descrit en el punt 3.4–, no els hem de confondre en absolut. Els treballs de Beer i de Braitenberg són simulacions en entorns de computador; els de Brooks –i en general els que es descriuen en aquest punt– són realitzacions físiques i, per tant, susceptibles d'un major realisme i d'una més gran riquesa de matisos en el seu comportament. "No és el mateix simular que realitzar", diu Brooks. Ni és el mateix programar una simulació que programar un sistema físic per tal que "navegui" en un entorn real. La diferència fonamental deriva no tant del vehicle o del robot mateix, com de l'adequació i exacta correspondència entre l'entorn simulat i l'entorn real. Hi ha quelcom en el món real que sembla que s'escapa a la formalització que se'n fa en la simulació. El problema, doncs, està a construir un model del "món"; model, d'altra banda, que hauria de ser produït de manera autònoma pel robot mateix que "viu" en aquest món...

### 3.5.2. Dels sistemes pre-biòtics a la nanotecnologia

Per superar els límits que imposa l'estructura material amb què estan realitzats els sistemes de vida artificial que hem vist fins ara, s'han iniciat línies de recerca per aprofundir en les característiques generals dels tipus de *materialitat* que requereix l'organització de la vida, i s'experimenten nous materials i noves tècniques de manipulació dels components de base, per obrir vies alternatives a l'experimentació de sistemes artificials de vida.

El problema que es planteja no és senzill: tot i admetre que la lògica de l'organització biològica està profundament imbricada en una materialitat específica, no és una qüestió trivial delimitar, ni que sigui en termes generals, les condicions que han d'acomplir els components materials del medi ni tampoc, alternativament, quins materials són descartables ja des de l'inici. Determinar les limitacions intrínseques a la universalització de l'organització de la vida que deriven d'una materialitat específica pot ser una tasca força àrdua! Recordem, per exemple, que el contingut informacional de la seqüència d'aminoàcids d'una proteïna depèn alhora de la informació de tipus lògic explícita en la seqüència (programari) i de la informació de caire topològic implícita en l'especialitat tridimensional de cada aminoàcid (maquinari). El contingut informacional depèn, per tant, de l'especificitat material de les proteïnes.

Fruit de tot el que s'ha exposat, sembla plenament justificat que per tal d'assolir avenços significatius en el camp de la investigació bàsica en vida artificial s'intenti ara explotar al màxim les propietats autoorganitzatives de sistemes moleculars diversos. Això permetrà fer efectiva la síntesi de sistemes amb capacitats evolutives i autoreproductives.

Si en l'univers material de la vida artificial, i més enllà dels sistemes abiòtics, establim una jerarquització basada en les possibilitats que ofereixen diverses tècniques emprades per a la realització de sis-

temes, podríem destacar, en un primer nivell, aquelles que es basen en la utilització de components químics o moleculars de baixa complexitat, com ara les realitzacions efectuades de sistemes autopoètics i autoinformativacionals (sistemes pre-biòtics); en un segon nivell, aquelles que permeten ja la manipulació o la realització de components de complexitat comparable a la dels que deriven de *l'evolució natural* (sistemes biòtics). Entre aquestes darreres podem diferenciar les que permeten la modificació de l'herència biològica per manipulació del material genètic (*enginyeria genètica*) de les que possibiliten la construcció o modificació de components macromoleculars idèntics o equiparables amb els d'origen biològic (*nanotecnologia*).

### **Realitzacions autopoètiques**

De la mateixa manera que alguns treballs centrats en models computacionals de la vida artificial (com els vehicles de Breitenberg o els insectes de Beer) han inspirat realitzacions materials en forma de robots mòbils (vehicles, *Attila*, etc.), també trobem realitzacions materials que implementen plantejaments formals de la vida artificial. Així, per exemple, la teoria autopoètica porta a la realització de les *micel·les invertides* de Luisi i Varela o als *sistemes de creixement osmòtic* de Zeleny i col·laboradors (en Langton, 1989).

Les micel·les invertides (en Fernández i Moreno, 1992), són estructures físiques compostes per molècules surfactants que, quan es dissolen per damunt d'una concentració crítica, formen agregats esfèrics en els quals les cues hidròfobes del surfactant queden a l'exterior, mentre que els camps polars s'orienten a l'interior de l'estructura esfèrica, creant-se la "*membrana*" –típica dels sistemes autopoètics– com a resultat de les reaccions –metabolisme– dels components que engloba. Si bé les micel·les invertides materialitzen alguns aspectes de l'organització d'un ésser viu, costa imaginar que aquest tipus de sistemes puguin evolucionar vers formes d'organització més completes.

Es podrien fer consideracions anàlogues a les precedents sobre els sistemes de creixement osmòtic de Zeleny i col·laboradors (en Langton, 1989) tot i que, segons afirmen, els seus sistemes tenen una “terrible semblança amb les formes, maneres i comportament [...] que intuïtivament associem amb els organismes vius”.

## **Enginyeria genètica i nanotecnologia**

Es podria pensar que *l'enginyeria genètica* és l'eina més poderosa per a la creació de noves formes de vida artificial, però això -si més no des del punt de vista teòric- no és així. Limitar-se a modificar l'herència biològica per mitjà de la manipulació del material genètic, per potent que pugui resultar com a eina i per espectaculars que puguin semblar alguns dels resultats obtinguts, té una limitació formal d'origen: pressuposa implícitament que la causa fonamental de l'organització biològica radica en el nivell d'informació genètica i oblida novament que l'organització dels éssers vius està constituïda per dos nivells que es co-determinen mútuament. En actuar exclusivament sobre el component informacional, l'enginyeria genètica només pot aconseguir objectius limitats en el seu intent de crear noves formes de vida que no siguin modificacions de les existents.

En comparació amb l'enginyeria genètica, la *nanotecnologia* – que podríem denominar *enginyeria molecular*– té uns objectius molt més globals que aquella: no es limita a actuar sobre l'organització dels éssers vius manipulant els gens, sinó que ho fa a nivell molecular, submergint-se en el domini de les interaccions termodinàmiques on els processos d'autoorganització sorgeixen de manera espontània. Amb la seva capacitat d'actuació en un àmbit dimensional que se situa en el rang de 0.1 a 100 nanòmetres (mil·milionèsimes de metre), la nanotecnologia cobreix un ampli ventall d'aplicacions que poden abastar des de la construcció de *nanocomputadors*, fins a la de *nanoreplicadors* (sistemes auto-replicants obtinguts per mit-

jà de la nanotecnologia). La nanotecnologia és la tècnica que ofereix actualment les perspectives més prometedores per arribar a produir noves formes de vida (Drexler, 1980; Hameroff, 1987).

Només explotant al màxim les propietats autoorganitzatives de determinats components macromoleculars serà possible la síntesi de sistemes nous amb capacitats evolutives i autoreproductives. Aquests sistemes probablement es diferenciaran dels naturals, no tant per una diferència radical en la materialitat del seu suport bàsic, com per una manera diferent d'expressar o de codificar el seu contingut informacional. Cal dir, però, que en aquests temes queda encara molt camí per recórrer i s'han de resoldre problemes bàsics i fonamentals.



“Un organisme viu no és més que una màquina meravellosa.”

**Claude Bernard**

#### **4. CONSIDERACIONS FINALS**

##### *De la lògica de l'home a la lògica de la vida*

Arribat a aquest punt he de confessar que em sento una mica perplex i desconcertat; alhora decebut i esperançat. Al llarg de més de dos anys –segurament abusant de la inestimable benevolència de tots vostès– he anat recollint material i ordenant idees per a preparar aquest discurs. Volia explorar alguns dels diversos àmbits on convergeixen i es troben els éssers vius i els éssers inanimats. Els éssers “creats” i els éssers “construïts” o concebuts per l’enginy humà en la seva prometeica recerca de les claus de la vida. Amb les seves similituds i les seves dissimilituds, els seus punts forts i les seves mancances. He tractat, probablement amb poc èxit, de separar conceptes, de garbellar el gra de la palla, de delimitar allò que correspon a la dimensió maquinista de l’organisme i allò que és privatiu de la nostra naturalesa viva, evolutiva...

Què n’he tret de tot això? Doncs poc i molt, depèn com es miri. En primer lloc un bany de modèstia. També l’admirativa contemplació de la intuïda extraordinària complexitat de la vida i la seva inabastabilitat. Entendre que si bé el reduccionisme i el mecanicisme possiblement siguin útils per a estudiar o comprendre alguns dels fenòmens del món de la tècnica –la màquina-màquina– no serveixen per a aproximar-se a l’estudi de la vida-vida, aquesta màquina meravellosa que, segons Claude Bernard, és, en el fons, tot organisme viu.

Enfront del reduccionisme, globalitat! Heus aquí la vertadera dificultat i l'origen de la meua perplexitat. Deia Paul Valery "El que és senzill no és cert, el que és complex no és utilitzable." Què hi podem fer! Són infinites les variables i les circumstàncies, intrínseques i extrínseques, que conflueixen i s'entrecreuen en el fenomen de la vida.

Un programa informàtic es pot comprendre i analitzar per si mateix, al marge del computador que li dona suport, i viceversa. El genoma, en canvi, no es pot reduir, s'ha de globalitzar. El genoma, com hem vist, no és un computador –tal com l'entendem– o, si més no, no és només un computador, com tampoc és un algorisme, ni potser tampoc les dues coses alhora... La seva actuació depèn de la seva materialitat i de l'immediat medi en què es troba, i depèn també del medi en què se situa i interacciona l'organisme viu que el suporta...

Tot això no és modelitzable matemàticament ni és computable avui dia. No obeeix la lògica mecanicista ni cap de les lògiques que hem elaborat fins ara. Però tampoc hem de creure que obeeix lleis esotèriques o metafísiques. En qualsevol cas obeeix la lògica de la vida, la que encara hem d'acabar de trobar.

Els xinesos, amb ancestral saviesa, utilitzen tres caràcters o pictogrames per a representar el mot biologia. Llegits per separat, l'un rera l'altre signifiquen: vida, lògica, estudi. Estudi de la lògica de la vida. És el que ens cal fer! Si creiem i tenim fe en la intel·ligència humana, emanació de la més sofisticada creació de la meravellosa vida, la lògica de la vida ens haurà de ser, un dia o altre, accessible.

Mentre aquest moment no arribi, fem nostra la frase de Wiener, pare de la cibernètica:

"Donem a l'home el que és de l'home i al computador el que és del computador."

Moltes gràcies per la vostra atenció!

DISCURS  
de resposta de l'Acadèmic Numerari  
Molt Il·ltre. Professor  
**Dr. FRANCESC PUCHAL I MAS**



Excel·lentíssim Sr. President  
Molt Il·lustres Srs. Acadèmics  
Digníssimes autoritats,  
Senyores i Senyors

Estimo totalment innecessari remarcar l'honor que per a mi ha suposat que se'm designés per a rebre el professor Gabriel Ferraté i Pascual, en l'acte de la seva presentació en el si d'aquesta institució tan prestigiosa que avui ens acull, com és la nostra Reial Acadèmia de Medicina. Va ser una barreja d'orgull, i alhora de modèstia, per un honor immerescut, el que vaig sentir quan se'm va fer evident que hauria de presentar el professor Ferraté, fer un breu recorregut per la seva vida i respondre al seu discurs d'entrada a la nostra Reial Acadèmia.

Com fer-ho per ressaltar les qualitats, tant humanes com acadèmiques i professionals, d'una persona per la qual hom sent una profunda admiració i respecte, com també bona amistat, i saber plasmar la realitat dels seus mèrits?

Potser a l'hora d'explicar els meus sentiments en aquest moment, podria avançar-me en la discussió del seu discurs de recepció i respondre al dilema shakesparià que ha presentat el professor Ferraté. Som o no som màquines? Possiblement som màquines biològiques que poden ser explicades per sistemes reduccionistes, ontològics,

metodològics o epistemològics. També som éssers dotats d'uns sistemes i components fisiològics, fins i tot possiblement neurològics, que aïlladament poden ser explicats per raonaments de tipus reduccionista. Però, a més a més, som un conjunt d'emocions i sentiments, a vegades amb dificultats d'expressió, que avui, a mi, se'm barregen sense cap ordre lògic, en intentar plasmar en paraules el que crec que és la personalitat del professor Ferraté.

Tal vegada el record de la seva trajectòria vital ens servirà per anar definint la seva personalitat. El professor Ferraté nasqué a Reus, capital del Baix Camp, bressol de tantes personalitats de la nostra terra. Terra de la qual porta l'empremta en tots els seus actes i que jo, per qui Reus i els seus homes han jugat un paper molt important en el desenvolupament de la meua vida, he cregut veure reflectida en totes les converses i contactes personals i professionals que he mantingut amb el professor Ferraté al llarg d'aquests anys.

Nascut en el si d'una família molt arrelada a la terra i impulsat, no tan sols per la insistència paternal, sinó, —jo crec, coneixent-lo—, per una inconscient atracció per la terra i tot el que en ella hi viu, va iniciar els estudis d'Enginyeria Tècnica Agrícola a l'Escola d'Agricultura de Barcelona, especialitzant-se en temes enològics (propis de la casa pairal) i simultaniejant, a la vegada, els estudis d'Enginyeria Industrial, l'estudi de les màquines, de les quals avui ens ha parlat, des d'un punt de vista novedós per a molts de nosaltres, en particular en relació amb la vida. Evidentment, és clar, aconseguí les dues coses: el 1955 fou perit agrícola i poc després, el 1958, es doctorava en Enginyeria Industrial. Qui li havia de dir a l'aleshores estudiant Ferraté que pocs anys més tard, no gaires per cert, seria rector de la Universitat Politècnica de Barcelona, regint els destins de tots dos centres universitaris!

I qui m'ho havia de dir, a mi, que he estat director de la dita Escola d'Agricultura, i em pregunto si aquest pensament no haurà passat també pel cap del professor Bech, que avui ens acompanya en

aquest acte, i a qui vaig tenir l'honor de passar la batuta de l'Escola, que els estudis de la nostra estimada Escola d'Agricultura, definits com a estudis de tipus pràctic, poguessin marcar, de manera tan profunda, l'esperit dels nostres alumnes. I entre ells el del jove Ferraté, fins al punt que aquest sentiment d'allò biològic, dels misteris de la vida, tan vegetal com animal, l'acompanyessin al llarg de tota la seva vida i ens els portessin avui aquí, no com un enginyer mecanicista, sinó com un enginyer biològic, que busca en la biologia, en la fisiologia, en la medicina el punt de partença de tots els avenços tecnològics de l'enginyeria industrial, tant en quant s'apliquen a les ciències biològiques i que es tradueixen en noves disciplines, com són la robòtica, la cibernetica, etc. Tan sols un esperit extraordinàriament sensible i a la vegada de bona talla intel·lectual podia anar assimilant coneixements, aparentment tan disperss, com són l'agricultura i l'enginyeria industrial, la biologia i l'electrònica, i fusionar-los, i avançar en edat de coneixements sense deixar ni els uns ni els altres.

Malgrat les seves inquietuds biològiques, és evident que s'havia d'inclinar per una de les dues disciplines. L'enginyeria fou la guanyadora i, si bé m'hauria agradat veure'l com a company professional més directe, no es pot pas dir que escollís el camí equivocat. La seva trajectòria professional ens ho demostra. Aconsegueix, per oposició, la càtedra d'Automàtica de l'Escola d'Enginyeria Industrial de Barcelona l'any 1965. Quatre anys més tard accedeix a la direcció de l'Escola i tres anys després, el 1972, és elegit rector de la Universitat Politècnica de Barcelona. Veritablement, no es pot demanar gaire més! Si, a més a més, afegim que ha estat reelegit quatre vegades seguides, esdevenint un dels rectors d'universitat de més longevitat acadèmica, podríem ja concloure la seva trajectòria acadèmica. Però, evidentment, no és així ja que, si bé ha deixat recentment el càrrec de rector de la Universitat Politècnica, per voluntat pròpia, s'ha deixat temptar per un repte realment excitant, com és la direcció de la recentment creada Universitat Oberta de Catalunya. Aquest nou repte li ofereix desenvolupar, com a nou rector

i organitzador de les noves activitats acadèmiques, les més modernes tècniques de la informàtica aplicades a la docència, amb unes idees veritablement espectaculars en el camp de l'ensenyament.

En arribar a aquest punt, podríem deixar la seva trajectòria professional amb la tranquil·litat d'esperit d'haver complert ben satisfactòriament amb el que ens mana la Reial Acadèmica de Medicina, és a dir, presentar un candidat amb un historial científic i acadèmic adient. Els seus fets així ho acrediten. Dues carreres acadèmiques, catedràtic, autor de nombroses publicacions científiques, conferenciant de talla internacional, director de l'Escola d'Enginyeria de Barcelona i després rector de la Universitat Politècnica de Catalunya. I tot a una velocitat vertiginosa!

Però no, és evident que la plena activitat acadèmica no era prou per satisfer el seu esperit inquiet. Requerit per les altes esferes governamentals, fou temptat a ocupar càrrecs d'importància política, si bé sempre vinculats a l'ensenyament i a la universitat, com foren una breu escapada a Madrid de 1976 a 1978, com a director general d'Universitats i Investigació i també com a director general de Política Científica. Jo gosaria dir que potser fou l'enyorament de la seva Universitat i de la seva terra, el que feren tornar "a casa" i gaudir d'una tranquil·litat espiritual que li permetés dedicar-se a temes més adients al seu caràcter.

Si a la seva trajectòria acadèmica ja descrita, hi afegim altres càrrecs i nomenaments d'importància: soci numerari de l'Acadèmia de Ciències Mèdiques de Catalunya i Balears, acadèmic numerari de la Reial Acadèmia de Ciències i Arts de Barcelona, membre numerari de l'Institut d'Estudis Catalans, membre de la recentment fundada *Academia de Ingenieria de España*, vice-president de la Comissió interdepartamental de Recerca i Innovació Tecnològica (CIRIT), vice-president de la Fundació Catalana per a la Recerca, director de l'Institut de Cibernètica, president de l'Agrupació Espanyola de Bioenginyeria, membre del Comitè executiu de la *Interna-*

*tional Federation of Automatic Control* etc.; així com una llarga llista d'honors i distincions, com són la Gran Creu de l'Ordre Civil d'Alfons X el Savi, Chevalier i posteriorment *Officier de l'Ordre des Palmes Académiques* de França, Medalla Narcís Monturiol de Catalunya, doctor Honoris Causa per la *Universidad Politécnica de Madrid* etc. podem arribar a copsar la veritable personalitat científica del professor Ferraté.

No voldria deixar el seu currículum sense fer referència a les seves incursions per la indústria de l'automatització: l'electrònica, la informàtica i la cibernètica, com fou la creació d'una empresa de regulació de tràfic per computador, que acabà transformant-se en una de les més grans de l'Estat i de la qual en sortiren en bona part els complexos sistemes actuals de control de trànsit de Barcelona i molts altres països, en els quals les seves tècniques inicials foren implantades. S'ha dit tot sovint que els professors universitaris, particularment els de les disciplines tècniques, haurien de contactar amb la vida industrial i fins i tot social, del seu entorn, per ser veritablement útils, no tan sols en l'ensenyament estricte de la seva disciplina, sinó en la transmissió dels coneixements científics aplicats a la realitat del seu entorn. Si és així, una vegada més veiem com el professor Ferraté ha sabut arribar a ser quelcom que no sol ser gaire fàcil: un bon científic i un bon professional a la vegada.

I no voldria tampoc passar sense fer referència a una de les seves aficions, aquesta molt més espiritual i poètica que els senyals de tràfic, com és la seva inclinació pels llibres i la poesia. Eminent bibliòfil, amb una amplíssima biblioteca de llibres de poesia catalana, sens dubte una de les millors de Catalunya, on té cura dels seus llibres, arribant fins a l'extrem de relligar-ne alguns, sempre que els temps li ho permeti, naturalment! I puc donar fe, personalment, que no tan sols són els llibres de poesia els que llegeix, sinó que la seva referència i coneixements dels textos dels metafísics i filòsofs més actuals, com avui ens ha demostrat, són testimoni clar d'una vida envoltada de llibres, de cultura i del saber de la humanitat.

No podria pas acabar aquesta ràpida descripció de la vida del doctor Ferraté, sense fer esment de la seva família, els seus fills i molt particularment la seva esposa, Josefina. Sé molt bé que no és fàcil arribar a portar una vida com la que acabem de descriure sense el recolzament amorós d'una esposa pacient i comprensiva, sempre atenta a les seves necessitats, i d'uns fills conscients de les responsabilitats del pare; en fi, sense el caliu d'una família que avui, aquí amb tots nosaltres, estic ben segur que comparteix amb orgull, com a cosa seva, tot el goig i l'honor d'aquest acte.

Finalitzaré aquest recorregut, necessàriament breu, per la vida del professor Ferraté, plagiant un comentari d'un dels seus bons amics i col·legues, el professor Bassegoda. El títol de rector, digué el professor Bassegoda, dóna dret al tractament de Magnífic, i aquest tractament li escau con anell al dit, i poques vegades -afegeixo jo- un tractament escau i defineix tan bé qui el porta, com en el cas del professor Ferraté.

En el preceptiu discurs de recepció, que acabem d'escoltar, el professor Ferraté ens ha parlat de la vida, de l'ésser humà i de com la capacitat creadora de l'home ha anat generant tots els processos tecnològics que avui condicionen i controlen la nostra vida i la de totes les màquines, des de les més senzilles fins als ordinadors més sofisticats, que avui ens envolten i ens fan més plaent i còmoda la vida. Ens ha parlat de com l'ésser humà ha somiat amb la possibilitat de crear autòmats capaços d'imitar les funcions primordials dels éssers vius, i fins i tot, ens ha parlat dels somnis de l'home per crear vida, més enllà, s'entén, de les funcions reproductores pròpies de l'espècie humana.

Avançar en aquests processos ens ha portat al desenvolupament de l'anomenada "intel·ligència artificial", paraula esfereïdora, altament associada als ordinadors que, indubtablement, ens demostren dia a dia una capacitat de càlcul, d'imitació matemàtica, molt superior a la de l'home. Però, malgrat això, fins ara no ha pogut fer el

salt d'aquesta "intel·ligència comptable", purament mecanicista i matemàtica, a una intel·ligència creadora, sensible a les emocions i als sentiments propis de l'ésser humà. És innegable que aquesta intel·ligència artificial ha permès anar creant, sempre dirigida per l'home, membres i òrgans artificials, de semblança estricta a les pròpies de l'ésser humà, per suplir les seves disfuncions, cosa que ens ha portat a l'enginyeria biomèdica, i d'aquí a la robòtica i a la cibernètica.

En el seu discurs, el professor Ferraté ens parla de "Màquines i Vida", ens porta de la mà per explicar-nos els nous conceptes d'enginyeria biomèdica i ens frapa amb els estudis que semblen tenir com a objectiu reproduir la vida. Ens condueix vers el concepte de "vida artificial", generada amb la forma d'automatismes capacitats per reproduir una molt bona part de les funcions de la vida, fins i tot les més complicades, i ens porta finalment a explorar la possibilitat de crear "vida".

Permeteu-me que digui que em complau veure ressorgir, una vegada més, la seva formació biològica, a l'hora de relacionar els coneixements provinents de les diverses disciplines biològiques, per buscar i explicar, i el que és més important: trobar solucions que permetin a les màquines realitzar funcions cada vegada més properes a les de l'ésser viu.

El professor Ferraté ens fa una descripció prou extensa de les màquines intel·ligents, però ressaltant el fet transcendental –i aquesta és una reflexió molt important– que les màquines, per perfectes que siguin, només poden desplegar una sèrie d'activitats, basades en unes seqüències de coneixements predefinits, basats en la informació que prèviament l'home els hagi subministrat. Però, en el meu modest entendre, ens diu que no crearen res de nou, almenys en el sentit més pur de la creació, ni tan sols a base d'encerts i fallides, com semblava voler definir la creació de la vida l'eminent filòsof Karl Popper.

No cal negar que els conceptes avançats per Popper ens fan pensar, i molt. Però, arribar a la conclusió que la vida, aquest conjunt de sistemes orgànics, meravellosament engranats, fins i tot en el més insignificant dels insectes, sigui el resultat de l'atzar, i no d'una planificació superior, se'ns fa, a molts de nosaltres, difícil d'acceptar. Sens dubte, les seves referències a la nostra por a equivocar-nos, al risc de frenar la creativitat humana quan juguem a ser deus, quan volem crear coses, se'ns fan més acceptables en el reconeixement implícit de la nostra feblesa i inseguretats.

Però, què és la vida? Certament, a la llum dels coneixements actuals, no podem acceptar la definició de vida que ens dona el Diccionari Acadèmic de Medicina. És una descripció massa senzilla, no sembla preveure la capacitat creadora de l'ésser humà, sembla limitar-se a les formes més senzilles de vida. No ens diu res dels processos mentals, de la intuïció creadora, de l'espiritualitat i dels conceptes d'ètica i moral que avui configuren molt més el concepte de vida humana. És per això, que ens sembla difícil d'acceptar el concepte reduccionista, i molt menys el reduccionisme epistemològic, que pretén explicar qualsevol fenomen de l'ésser viu, de l'ésser humà, a partir d'unes bases estrictament matemàtiques, físiques o fins i tot, lògiques, i que ens vol portar a creure que tot, fins i tot la pròpia vida, es pot explicar per les lleis bàsiques de la física i la química.

El professor Ferraté continua descrivint-nos el procés evolutiu del seu pensament i ja en termes més deslligats de l'ortodòxia reduccionista, ens recorda que la biologia, la psicologia i altres formes científiques del pensament humà, són més difícils d'explicar, i òbviament de reproduir, a través de sistemes merament mecanicistes. També ens recorda que les màquines, per complexes que siguin, només poden desplegar activitats predefinides, matemàticament o física. És a dir, la seva transparència és total, no ens podran sorprendre amb actuacions inesperades, no poden "crear" nous fets ni conceptes.

Malgrat això, ens exposa l'evidència del fet que l'ésser humà, sobretot a nivells científics elevats, es resisteix a admetre que hi ha quelcom superior en el procés creatiu, més complex que els sistemes matemàtics i físics més sofisticats, més enllà de les possibilitats d'una Màquina Universal de Turing, per més idealitzada que sigui. Fins i tot han sorgit noves línies de pensament, que pretenen explicar-ho, cercant interpretacions matemàtiques o físiques dels fets biològics. Així, doncs, ens trobem amb els sistemes estocàstics, quàntics i fins i tot caòtics que pretenen explicar-ho tot, d'una manera o d'una altra!

A mesura que ens parlava, el professor Ferraté ens ha portat, quasi sense que ens adonéssim, fins a les fronteres de la vida artificial. Els avenços en els camps de la intel·ligència artificial, la robòtica, el reconeixement de formes i molts altres camps científics i filosòfics, són tots ells fruit de la capacitat creadora de l'ésser humà. Són els mateixos paradigmes de la complexitat de l'ésser que pretenem crear. No fan més que apropar-nos al coneixement més íntim de la vida, d'aquesta vida cada vegada més lluny de la descripció merament fenomenològica que trobem en els diccionaris, i que no fa més que ressaltar que hi ha en nosaltres, en els éssers humans, quelcom espiritual, quelcom que s'escapa de les mans dels científics més ortodoxos, quan ja creiem tenir-ho tot controlat, i que no és res més que el que dóna sentit a la vida que pretenem crear. L'espiritualitat de l'ésser humà, que està més enllà del concepte de vida robòtica.

Cal reconèixer que el tractament que el professor Ferraté ha fet del concepte de la vida i de les màquines, ens ha permès introduir-nos en el pensament dels científics més avançats, aquells que busquen escurçar la distància entre les fronteres que separen la nostra vida de la vida artificial. Escoltar-lo ha estat sens dubte una experiència plaent i enriquidora, que ha fet ressaltar una vegada més la profunditat del seu pensament, d'aquesta meravellosa amalgama de coneixements biològics, físics, matemàtics i mecanicistes, que in-

dubtablement poden ser de gran vàlua en el patrimoni intel·lectual de la nostra Acadèmia.

Per tant, i estic segur que, d'acord amb el sentir de tots els companys acadèmics i amics presents aquí amb nosaltres, us prego senyor president que tingueu a bé imposar-li la medalla d'acadèmic, i amb aquest acte simbolitzar la seva acceptació i benvinguda com a nou acadèmic a la nostra benvolguda Reial Acadèmia de Medicina.

Moltes gràcies.

## REFERÈNCIES

- ALIFE I, Interdisciplinary Workshop on Synthesis and Simulation of Living Systems, Los Alamos, 1987.
- AMAT, J., LÓPEZ DE MANTARAS, R., SIERRA, C. (1995). *Generation of Structured and Unknown Environment Maps by Means of Cooperative Autonomous Minirobots*. Fourth International Symposium on Experimental Robotics, Stanford, Ca.
- ARBIB, M.A. (1964). *Brains, Machines and Mathematics*, McGraw Hill, New York.
- ASHBY, W.R. (1954). *Design for a Brain*. Chapman and Hall, London (2a edició).
- BECKER, E.W., EHRFELD, W., HAGMANN, P., MANNER, A., MÜNCHMEYER, D. (1986). *Fabrication of microstructures with high aspect ratios and great structural heights by synchrotron radiation lithography, galvanofarming, and plastic moulding (LIGA-process)*, Microelectronic Engineering 4, pàg. 35.
- BEER, R. (1990). *Intelligence as Adaptive Behaviour*, Academic Press.
- BERLEKAMP, E.R., CONWAY, J.H., GUY, R.K. (1983). *Winning Ways for your Mathematical Plays*. Academic Press, London.
- BERNARD, CL. (1857). *Leçons sur les Propriétés Physiologiques et les Altérations Pathologiques des Liquides de l'Organisme*, vol. 1, pàgs. 41-62.
- BERNARD, CL. (1865). *Introduction a l'étude de la médecine expérimentale*, Garnier-Flammarion, París.
- BERZELIUS, J.J. (1962). *The Origin of Life*, Weidenfeld & Nicolson, London.

- BRAITEMBERG, V. (1985). *Vehicles. Experiments in Synthetic Psychology*, MIT Press, Cambridge, Mass.
- BROOKS, D., WILEY, E.O. (1986). *Evolution and Entropy: Toward a Unified Theory of Biology*, Univ. of Chicago Press, Chicago.
- CANNON, W.B. (1929). *Organization for Physiological Homeostasis*, Physiology Review 9, pàgs. 399-431.
- CASTI, L. (ed) (1987). *Real Brain/Artificial Mind*, North Holland.
- CHURCH, A. (1936). *An Unsolvable Problem for Elementary Number Theory*, American Journal of Mathematics 58, pàgs. 345-363.
- CONRAD, M. (1985). *On Design Principles for a Molecular Computer*, Comm. ACM 28, pàgs. 464-480.
- CSÁNYI, V. (1981). *General Theory of Evolution*, General Systems (Yearbook) 26, pàgs. 73-91.
- CSÁNYI, V. (1982). *General Theory of Evolution*, Publ. House of the Hungarian Academy of Sciences, Budapest.
- CSÁNYI, V. (1989). *Evolutionary Systems: A General Theory*, Duke University Press, Durham.
- DAWKINS, R. (1976). *The Selfish Gene*, Oxford Univ. Press, Oxford.
- DAWKINS, R. (1986). *The Blind Watchmaker*, W. W. Norton, New York. També editada en castellà: *El relojero ciego*, Labor, 1989.
- Diccionari enciclopèdic de Medicina (1990). Encilopèdia Catalana, Barcelona.
- DREXLER, K. (1980). *Engines of Creation. The coming era of nanotechnology*, Doubleday.
- ELSASSER, W. (1981). *Principles of a New Biological Theory: A Summary*, Journal of Theoretical Biology 89, pàgs. 131-150.
- EWENS, W. J. (1979). *Mathematical Population Genetics*, Biomathematics vol. 9, Springer, Berlin.
- FERNÁNDEZ, J., MORENO, A. (1992). *Vida Artificial*, EUDEMA, S.A., Madrid.
- FERRATÉ, G. (1985). *Interacción energética e informática en biorrobótica*, Actas de las IV Jornadas de bioingeniería, pàgs. 21c-34c, Agrupación Española de Bioingeniería, Sevilla.
- FERRATÉ, G. (1992). *Una aproximació taxonòmica a la robòtica*. Memorias de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona, vol. LI, (8).

- FEYNMAN, R. PH. (1983). Física, vol. 1, Addison-Wesley Iberoamericana, Wilmington, Del.
- FU, K. S. (1967). *Stochastic Automata as Models of Learning Systems*, Academic Press, New York.
- FUKUSHIMA, K. (1984). *A hierarchical Neural Network Model for Associative Memory*, Biological Cybernetics 50, pàgs. 105-113.
- GLANSDORF F. P., PRIGOGINE, I. (1971). *Thermodynamic Theory of Structure, Stability and Fluctuations*, Wiley, New York.
- GLEICK, J. (1991). *Chaos: The Software*, Autodesk Inc.
- Gran Enciclopèdia Catalana (1986). Enciclopèdia Catalana, S.A., Barcelona.
- HAKEN, H. (1977). *Synergetics. An Introduction*, Springer, Berlin.
- HAMEROFF, S. (1987). *Ultimate Computing. Biomolecular Consciousness and Nanotechnology*, North Holland.
- KALMAN, R., FALB, P., ARBIB, M. A. (1969). *Topics in Mathematical System Theory*, McGraw-Hill, New York.
- KAMPIS, G. (1991). *Self-Modifying Systems in Biology and Cognitive Science*, Pergamon Press.
- KUHN, T. S. (1970). *The Structure of Scientific Revolutions*, University of Chicago Press, Chicago, Ill.
- LAING, R. (1989). *Artificial Organisms: History, Problems and Directions*, en: *Artificial Life* (ed. Langton, Ch.), Addison-Wesley, Reading, Mass., pàgs. 49-62.
- LANGTON, CH. (ed.) (1989). *Artificial Life I*, Addison-Wesley.
- LANGTON, CH., TAYLOR, C., FARMER, J., RAMUSSEN, S. (editors) (1991). *Artificial Life II*, Addison-Wesley.
- MARGOLUS, N., TOFFOLI, T., (1987). *Cellular Automata Machines*, MIT Press, Cambridge, Mass.
- MATURANA, H., VARELA, F. (1973). *De Màquines y Seres Vivos*, Editorial Universitaria. Santiago de Chile.
- MATURANA, H., VARELA, F. (1980). *Autopoiesis and Cognition*, Reidel, Dordrecht.
- MATURANA, H., VARELA, F. (1990). *El árbol del conocimiento*. Editorial Debate.
- MCCULLOCH, W. S., PITTS, W. (1943). *A logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity*, Bulletin of Mathematical Biophysics 5, pàgs. 115-133.

- MENZ, W., BUSS, G. (1993). *Applications of Microsystems Engineering in Minimal Invasive Surgery, Endoscopic Surgery and Allied Technologies*, vol. 1, 93 (6), pàgs. 171-180.
- MEYER, J. A., WILSON, S. (editors) (1991). *From Animals to Animals*, MIT Press, Cambridge, Mass.
- MYHILL, J. (1964). *The Abstract Theory of Self-Reproduction*, en: *Views on General Systems Theory* (ed.: Mesarovic, M.D.), Wiley, New York, pàgs. 106-118.
- NEUMANN, J. VON (1951). *The General and Logical Theory of Automata*, en: *Cerebral Mechanisms in Behaviour*, Wiley, New York.
- NEUMANN, J. VON (1958). *The Computer and the Brain*, Yale University Press, New Haven.
- NEUMANN, J. VON (1966). *The Theory of Self-Reproducing Automata*, (ed. Burks, A. W.), Univ. of Illinois Press, Chicago.
- PASK, G. (1961). *An Approach to Cybernetics*, Hutchinson Publishers.
- PATTEE, H. (1985). *Cell Psychology. An evolutionary Approach to the Symbol-Matter Problem*, *Cognition and Brain Theory*, 5 (4), pàgs. 325-341.
- PIN, F. G., PARKER, L. E., DEPIERO, F. W. (1992). *On the design and development of a human-robot synergistic system*, *Robotics and Autonomous Systems* 92 (10), Elsevier, pàgs. 161-184.
- POINCARÉ, J. L. (1978). *Filosofía de la ciencia*. UNAM, México DC.
- PREISING, B., HSIA, T. C., MITTELSTADT, B. (1991). *A Literature Review: Robots in Medicine*, *IEEE Engineering in Medicine and Biology*, pàgs. 13-22 i 71.
- ROMODED '94. *1st. European Conference on Medical Robotics*, Asociación Española de Robótica, Barcelona, juny 1994.
- ROSEN, R. (1985). *Anticipatory Systems*, Pergamon, New York.
- ROSENBLATT, F. (1958). *The Perceptron*, *Psychol. Review* 65, pàgs. 368-408.
- SIMS, K. (1993). En: *Vida Artificial*, Art Futura 93, Barcelona.
- THOM, R. (1975). *Structural Stability and Morphogenesis*, Benjamin, New York.
- TURING, A. M. (1936). *On Computable Numbers, with an Application to Entscheidungsproblem*, *Proceedings of the London Mathematical Society* 42, pàgs. 230-265.

- WALTER, G. (1951). *A Machine that Learns*, Scientific American 51, pàgs. 60-63.
- WIENER, N. (1948). *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*, Hermann & Cie., éditeurs, París.
- WINFREE, A. (1974). *Rotating Chemical Reactions*, Scientific American, 74 (6), pàgs. 82-95.

