

# El Cau del Hàcker

*Enric Plaza*

## Calculant l'Origen de la Vida

La fertilització mútua d'idees i mètodes entre la biologia i les ciències de la computació (on inclouriem la I.A. i la cibernètica) té ara com ara una llarga història: començant la cibernètica (l'estudi de "la comunicació i el control en màquines i éssers vius"), passant pels algorismes genètics, i arribant a la vida artificial. Els algorismes genètics, per exemple, prenen una metàfora biològica, la selecció sobre poblacions d'individus amb capacitat de duplicació i variació, i en fan un mètode computacional per a processos d'optimització.

Tanmateix, el model biològic de l'evolució que actualment s'anomena "la síntesi moderna", i que unifica la teoria darwiniana de la selecció i adaptació de les espècies amb la teoria de l'herència, és radicalment incomplet. La teoria de l'evolució explica l'aparició de noves espècies a partir d'altres espècies existents, però és muda respecte l'origen primer dels éssers vius que constitueixen les espècies. Semblant és el cas dels algorismes genètics (AG), on és ben clar que l'input d'un AG és una població que ve donada, on cada individu és portador d'un "codi" sobre el qual s'efectuen els processos de duplicació, mutació i selecció. Poc tenen doncs a dir els AG sobre l'origen d'aquests "codis", així com poc té a dir la teoria de l'evolució, ara com ara, sobre l'origen de la vida, sobre la construcció del codi genètic. La bioquímica i la biologia molecular s'han encarregat de formular models sobre l'origen dels éssers vius. Aquest models són fisico-químics però vet aquí que uns investigadors han proposat un model computacional per l'origen de les estructures vivents: el  $\lambda$ -càlcul.

Walter Fontana, amb d'altres investigadors, ha proposat d'usar el  $\lambda$ -càlcul com un model (idealitzat) de l'estructura i la funcionalitat (la conducta) de les molècules químiques. L'interès del model és que permet construir, d'una manera força natural, els processos d'auto-organització que generen estructures amb capacitat d'auto-manteniment. Però abans d'entendre els processos d'auto-organització cal primer esbrinar perquè aquesta proposta és radicalment innovadora.

En biologia habitualment s'usen models provinents de la física, i que són extensionals; els models de sistemes dinàmics per exemple. Per aquests models cal donar extensionalment les especificacions de quines variables s'acoblen amb quines altres i la manera en que ho fan. Aquest marc és adient per a descripcions dels moviments gravitacionals d'uns quants objectes, però la biologia tracta d'objectes de complexitat combinatòria i això fa que, per exemple, segons Fontana, modelar la replicació, mutació i selecció de seqüències d'ARN de longitud 100 requeriria  $10^{60}$  equacions amb els seus respectius coeficients. L'alternativa que proposen els autors és emprar models *constructius*, és a dir models els objectes dels

quals es fonamentan en una estructura gramatical, en una estructura intrínsecament combinatòria.

### Un model constructiu

Walter Fontana proposa utilitzar el  $\lambda$ -càlcul com una eina per modelar els processos (químics) que generen organitzacions que s'auto-mantenen. El que els interessa aquí és el càlcul no com a matemàtiques, sino com a sistema formal que permet construir noves estructures complexes a partir d'altres estructures. Intuitivament, pensem en una població de expressions, la interacció dels quals ve donada per certes "regles d'inferència"; un sistema amb aquest components que interactuan estocàsticament hauria de ser consistent respecte les "conseqüències" d'aquest sistema formal (les expressions generades), i també respecte les conseqüències de les conseqüències--en altres paraules, la cinètica de poblacions hauria de ser estable en la xarxa de processos de construcció de nous components. Precisament aquesta és la idea de metabolisme.

Recordem ràpidament el  $\lambda$ -càlcul. Definim un càlcul on tots els objectes són *funcions*, expressades en la sintaxi formal del  $\lambda$ -càlcul, on els objectes s'apliquen sobre altres objectes i donen lloc a noves funcions. La gramàtica E de  $\lambda$ -expressions és simplement:

$$E = x \mid \lambda x.E \mid (E)E$$

on x és una variable. El primer combinador,  $\lambda x.E$ , és l'abstracció i el segon,  $(E)E$ , és l'aplicació d'una funció sobre un argument que també és una funció. Aquest combinadors prenen un significat operatiu amb la substitució:

$$(\lambda x.A)B \equiv A[B/x]$$

on  $A[B/x]$  denota la substitució de totes les ocurrencies de x en A per B. En altres paraules, l'expressió del'esquerra pot reescriure's com la de la dreta, i conseqüentment *només substituïm iguals per iguals*. Aquest procés d'efectuar totes les possibles substitucions s'anomena *reducció* i la forma (estable) a la qual convergeix és la *forma normal*. El model de Fontana suposa que tota expressió es reduïx a la forma normal dins uns límits computacionals. Les expressions que no assoleixin la forma normal no són permeses.

### La dinàmica del model

La metàfora que s'utilitza dons és veure les objectes químics com entitats computacionals. La correspondència és la següent:

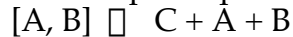
Química	Càlcul
molècula física	expressió que representa un operador
conducta de la molècula	acció de l'operador
reacció química	avaluació de l'aplicació funcional

Per tal de fer experiments cal ara establir un context físic. En el model de Fontana l'interés està en recobrir aquest càlcul/química amb una cinètica (un sistema dinàmic). Finalment es voldrà trobar un model matemàtic d'aquesta cinètica que expliqui els processos d'auto-organització. El context físic és el que els químics anomenen un reactor de flux. Aquest és una "caixa" on se situen uns quants milers de  $\lambda$ -expressions generades aleatòriament. Aquestes  $\lambda$ -expressions interaccionen,

creant-ne de noves; finalment hi ha un flux d'entrada (les  $\square$ -expressions generades que s'autoalimenten al sistema) i un flux de sortida (algunes  $\square$ -expressions són eliminades—surten de la “caixa”).

Usem ara el  $\square$ -càlcul com un sistema dinàmic (estocàstic) amb un número finit d'“expressions-partícules” amb les següents propietats:

1) *Inicialització* del sistema amb  $N$   $\square$ -expressions generades aleatòriament.  
2) *Interacció* de dues expressions  $A$  i  $B$  escollides aleatòriament (en aquest ordre) s'escriu  $[A, B]$  i es defineix com  $C$ , on  $C$  és la forma normal de  $(A)B$ . En el sistema dinàmic s'interpreta que té lloc la següent “reacció”:



3) *Condicions límit* determinen si  $C$  és vàlida per entrar o no en el sistema  
4) *Mida constant*. Si  $C$  entra al sistema s'elimina aleatòriament una altre expressió  $D$ .  
5) *Iterar* el model

Aquest senzill model, inspirat en reactors de flux capacos de tenir cinètiques autocatalítiques, formalitza la noció d'“organització” biològica, on diversos nivells d'organització es poden descriure com xarxes de processos emergents automantinguts. A continuació veurem els tres nivells que emergeixen d'agafar el  $\square$ -càlcul com un sistema dinàmic, però abans cal veure l'ús que es fa aquí del  $\square$ -càlcul. Cada “expressió-partícula” té una estructura (la sintaxi de l'expressió) i una conducta (el resultat d'aplicar la funció); aquesta conducta és de fet una interacció, donat que el resultat d'aplicar la funció depen del paràmetre al qual s'aplica (una altra “expressió-partícula”). Com hem dit el resultat de la interacció de dues “expressions-partícules” és una tercera:  $A(B) \square C + A + B$ . Cada interacció crearà a l'atzar una nova estructura sintàctica (partícula) que podrà interaccionar amb altres i crear noves estructures. Tanmateix les partícules també s'eliminen a l'atzar...quin punt d'equilibri es pot establir? Quin tipus d'expressions poden multiplicar-se —potser associant-se amb altres expressions que també es multipliquen gràcies a aquesta associació? Els nivells d'organització descriuen aquestes dinàmiques que s'auto-mantenen.

## Nivell 0

El nivell 0 apareix quan no hi ha condicions límit (3) especials. En aquest cas, el sistema es veu dominat bé per funcions isolades que s'auto-copien o bé per conjunts de funcions de còpia lligades per hipercicles. Les funcions que s'auto-copien són de la forma  $A(A)=A$  i en poden coexistir diverses d'elles. Els hipercicles són sistemes de funcions on per cada  $B$  hi ha almenys una  $A$  tal que  $(A)B=B$ . Formalment  $B$  és un punt fix d' $A$ , però biològicament si considerem l'espècie formada per les  $B$ s, aquí tenim l'esquema d'un “replicador” que necessita d'una altra espècie, les  $A$ s, per reproduir-se. Si s'introduïxin perturbacions en el sistema aquest sovint col.lapsa en una sola funció d'auto-còpia.

## Nivell 1

El nivell 1 apareix només quan hi ha restriccions (o l'eliminació total) de les accions de còpia. Això, de facto, elimina la selecció darwiniana a la qual estem acostumats a associar l'evolució. En aquestes condicions, el sistema arriba a posseir expressions

pertanyents a un subespai de l'espai de  $\square$ -expressions amb tres característiques importants.

1) *Gramàtica estructural*. Apareix una gramàtica implícita del subespai de  $\square$ -expressions; és a dir un subllenguatge. Totes les  $\square$ -expressions tenen una estructura que l'observador pot comprovar que pertanyen a la gramàtica.

2) *Estructura algèbrica*. Totes les relacions d'acció entre els objectes del subespai es poden descriure amb un conjunt d'equacions. Alguns objectes tenen "rols" que es poden descriure — com elements inversos o neutres, funcions successor, etc.

3) *Auto-manteniment i persistència cinètica*. El subconjunt de la totalitat dels objectes que "te" la organització es manté a si mateix en el sentit que tot objecte es produeix per almenys una interacció amb altres objectes del subconjunt. Aquest auto-manteniment s'esdevé de la relació constructiva que s'estableix entre els objectes.

Aquestes organitzacions tenen tres propietats: centre, autoreparació i extensibilitat. S'anomenen generadors als subconjunts d'objectes que, donats com població inicial del reactor de flux, són capacos de produir una organització. Les organitzacions de nivell 1 observades fins ara tenen un sol generador anomenat *centre*. L'*autoreparació* es dona com a conseqüència de l'auto-manteniment i de l'existència d'un centre, de manera que la organització pot regenerar-se després de destruccions força grans.

L'extensió del sistema requereix "soroll", perturbacions externes; altrament un cop estabilitzada l'organització a nivell 1, l'evolució s'atura. Una manera de posar-hi soroll és injectant objectes d'estructura aleatòria. Per tal que aquest nou objecte persisteixi ha de crear uns camins transformacionals que el mantingui dins la xarxa establerta de camins transformacionals existents. En les situacions en què això s'esdevé, que son poques, el nou objecte comporta la incorporació de nous elements sintàctics i una modificació de la gramàtica i de les lleis algèbriques de l'organització. Típicament aquest procés comporta una extensió; és a dir, hi ha un nucli de l'organització que persisteix sense canvi, mentre que s'hi afegeix una nova "capa" amb les interaccions que comporta el nou objecte. Això també implica un canvi en el "centre" de l'organització, i després de moltes extensions s'esdevenen reorganitzacions de les capes existents; com a resultat l'organització ja no és una simple extensió de la original sino una modificada de manera substancial.

Un exemple d'organització nivell és el següent on els objectes tenen una estructura sintàctica particular. Tots els objectes són creats a partir de dos components (A, B), formant una cadena AA...AABB...BB amb un nombre  $i$  d'As i un nombre  $j$  de Bs, on  $j$  és menor o igual al  $i$ . Denotarem aquesta estructura  $O_{i,j}$ . Totes les accions que tenen lloc en el sistema es poden descriure per dos lleis d'invariants, és a dir regularitats emergents en la cinètica del sistema. La primera llei és:  $[(O_{i,j})O_{k,l}=O_{i-1,j-1}$  per tot  $j>1, i k l]$ , i la segona llei és  $[(O_{i,1})O_{k,l}=O_{k+i-1,l+i-1}$  per tot  $i k l]$ . Cal notar que les lleis emergents no fan cap referència al  $\square$ -càlcul subjacent, però són suficients per tal de descriure el producte de la interacció d'objectes qualsevols dins el sistema. Aquest exemple il·lustra què és un nivell d'organització emergent: és una

situació on a) les regularitats són produïdes per les interaccions locals i no imposades sobre els objectes que interactuen, i b) les lleis representen un nivell de descripció en el sentit que no es refereixen a la micromecànica del sistema.

## Nivell 2

Les organitzacions nivell 1 poden combinar-se. Intuitivament, podríem esperar que dues organitzacions en contacte produïrien dinàmiques destructives. Ara bé, els objectes de les dues organitzacions poden ser força diferents entre ells, i llur interacció pot produir objectes que no eren presents en cap de les dues organitzacions originals. Aquests nous objectes, producte de la “comunicació” entre dues organitzacions nivell 1, no són organitzacions de nivell 1 perquè no són tancades respecte una gramàtica. Walter Fontana els anomena “cola” perquè enganxen les dues organitzacions cinèticament i algebriquement; la meta-organització que combina les dues organitzacions originals com subàlgebres auto-mantingudes és l’organització nivell 2. L’emergència del nivell 2 no és habitual, força sovint una organització pot perdre la seva autonomia i esdevenir una extensió de l’altre. Biològicament això modela les situacions on un simbiote intracel·lular perd funcions redundants a les que posseeix l’hoste.

Els nivells organitzatius esmentats són, per mi, interessants purament des del punt de vista formal com a model de l’auto-organització i de l’emergència de propietats estructurals. Tanmateix, llur correlat biològic és també força interessant. La transició que va de molècules auto-replicants (o llur incorporació) a cèl·lules procariotes<sup>1</sup> auto-mantingudes recorda el pas del nivell 0 al 1. Aquesta transició va d’elements auto-replicants a organitzacions auto-mantingudes (però no auto-reproductores, malauradament pel model de Fontana). A més, del les cèl·lules procariotes varen emergir estructures imbricades de diferents llinatges procariotes que donaren lloc a les cèl·lules eucariotes—transició que correspon al pas del nivell 1 al 2.

El model proposat per Walter Fontana i altres és realment atractiu. Agafant uns elements de partida jo diria que minimalistes —□-càlcul i la idea del reactor de flux on les partícules són □-expressions—assoleix una teoria de l’auto-organització que és realment potent, tant formalment com en el seu vessant de model (constructiu) de processos bioquímics. Cal recordar també que l’auto-organització és no només un dels temes claus de la vida artificial, sino que ja era un tema de discussió en la cibernètica per autors clàssics com Gordon Pask i Heinz von Foerster; si això va ser la dècada dels 50 i dels 60, el tema va quedar relegat per temes més urgents, que no més importants. Francisco Varela i altres proponents de la teoria de l’autopoiesi sobre els éssers vivents varen ser molt importants en tornar a situar la problemàtica de l’auto-organització, però no varen assolir un model formal satisfactori; van aconseguir, això sí, algunes simulacions interessants on, a partir

---

<sup>1</sup> Les cèl·lules procariotes no tenen nucli i l’ADN és dispers pel citoplasma. Les cèl·lules eucariotes tenen un nucli on està contingut tot l’ADN per una membrana que el separa del citoplasma; el citoplasma conté mitocòndries que, segons una teoria força acceptada, eren antigament cèl·lules procariotes independents que van formar una simbiosi amb cèl·lules més primitives, tot passant a fer certes funcions especialitzades a l’interior de les cèl·lules eucariotes modernes.

d'unes senzilles regles d'interacció entre "partícules", emergeix una "cèl.lula" amb nucli i membrana.

El model de Fontana et al. també té mancances com a teoria biològica, i la més evident s'ha esmentat abans: la manca d'auto-reproducció de les organitzacions de nivell 1 i 2, característica imprescindible tant per caracteritzar les cèl.lules com per assegurar el reeiximent dels nivells superiors d'organització respecte dels simples auto-replicants del nivell 0. Tanmateix, és un bon camí des del  $\lambda$ -càlcul fins al punt on, gairebé, està a punt d'aparèixer el codi genètic.