

Amador Menéndez
Velázquez

sense *f*ronteres

Una revolució en miniatura

Nanotecnologia al servei de la humanitat

Premi
Europeu
de Divulgació
Científica
Estudi
General



0

LES REVOLUCIONS CIENTIFICOTECNOLÒGIQUES

Potser és difícil acceptar que els canvis i els progressos tecnològics transformen el nostre món i les formes de vida, però un context històric ens pot ajudar a visualitzar-ho. D'altra banda, el ritme del canvi tecnològic s'accelera. En les pròximes dècades es poden produir més canvis tecnològics que en tot el segle passat. Les lliçons de les revolucions tecnològiques són la nostra millor guia quan ens enfrontem a allò que encara ha de vindre. Per això hem volgut articular aquest capítol zero, en un intent de conscienciar el lector de l'impacte de la ciència i la tecnologia en la nostra societat.

La primera meitat del segle xx va ser testimoni d'una explosió tecnològica que va alterar substancialment la nostra forma de viure. A l'any 1900 es considerava impossible l'existència de màquines voladores més pesants que l'aire; davant la sorpresa de tothom, cap al 1950 els avions ja s'aproximaven a la velocitat del so. En 1900, la majoria de les persones no tenia cotxe, electricitat o aigua corrent. En 1950, en tenien. Els mateixos cinquanta anys van veure una part essencial del desenvolupament dels antibiòtics, la ràdio, la televisió, els plàstics, les armes nuclears i els equips mecanitzats. Tractors, segadores i equips semblants van reduir en un factor deu el nombre de persones necessàries per a produir una quantitat determinada d'aliments.

En bona part, la marxa del progrés va continuar al llarg de la segona meitat del segle. Els avions de passatgers es van convertir en un transport comú i, amb el Boeing 747, el transport aeri es va fer rendible per a algunes classes de mercaderies. La xarxa mundial de comunicacions va forjar una economia mundial. Televisors, ordinadors, telèfons cel·lulars i aparells semblants arribaren a ser omnipresents en les nostres vides; es van assolir algunes fites històriques, com aquell 21 de juliol de 1969, quan l'home va arribar a la Lluna.

Si algú haguera dit a un agricultor de l'any 1900 que, en només un segle, els seus descendents passarien la major part del temps en edificis amb calefacció i aire condicionat, asseguts davant d'un ordinador, parlant, llegint o escrivint, potser s'ho hauria cregut, si creia en el progrés. Si li haguera dit que això seria considerat una *faena*, se li hauria rigut a la cara. Els triomfs de la tecnologia del segle xx –l'estómac ple i el fet de no haver de realitzar treball físic– són una realitat, tot i que han originat uns altres problemes.

I si el progrés no va encara més de pressa és perquè hi ha un fenomen real de rendiments decreixents. Una màquina d'afaitar amb dues làmines no és dues vegades més útil que una amb una sola fulla. Els cotxes van assolir un límit de velocitat i, per tant, un límit d'utilitat, a causa de les limitacions dels reflexos humans i no a les limitacions de la capacitat mecànica. Els avions de passatgers assoliren un límit de velocitat que és el resultat dels règims econòmics i d'optimització dels vols. La tecnologia per al vol supersònic de passatgers està preparada, però val massa diners.

El progrés científic

En la primera meitat del segle xx es va produir un gran impuls de la química i la física que va revolucionar la forma d'entendre el comportament de la matèria ordinària amb la mecànica quàntica. Un científic de 1950 podria donar una explicació racional de les propietats dels materials, basada en les parts minúscules que els formen. El científic de 1900 només podria haver arribat, a tot estirar, a explicar un conjunt d'observacions empíriques.

Un dels interrogants eterns ha estat: què som? La història, realment, comença als inicis de 1600. En 1633, al voltant de l'època en què Galileu era condemnat per l'Església, René Descartes va escriure un llibre titulat *De Homine*, en el qual tractava d'explicar alguns dels fenòmens del cos humà en termes mecànics. Descartes és famós per la doctrina de la dualitat, l'afirmació que existeix una distinció entre la ment, que actua misteriosament, i la matèria, que funciona mecànicament. El vitalisme, la creença en una *força de vida* que no acata les lleis de la física, la mecànica i la química, té una llarga tradició intel·lectual i Descartes hi va contribuir. D'altra banda, va obrir el camí per a buscar les explicacions mecanicistes dels fenòmens de la vida. El dualisme, intencionadament o no, va permetre la recerca de mecanismes per a la coordinació entre la mà i l'ull, per exemple, i va deixar l'espiritualitat, la moralitat i la consciència en la categoria de la ment.

Avancem ràpidament fins al 1825. Els químics continuen descobrint nous compostos i els divideixen en dues classes: inorgànics i orgànics, que mai no conflueixen. Els

compostos orgànics formen part dels éssers vius, mentre que els inorgànics els poden crear els químics als tubs d'assaig. Els compostos orgànics, per descomptat, es poden descompondre: n'hi ha prou a cremar-los. Però per a unir-los, creien, calia una força vital inefable. Aleshores, en 1825, un jove professor de química anomenat Friedrich Wöhler va produir un sòlid inert amb una mescla aquosa de cianur d'hidrogen i amoníac. En 1828 s'havia demostrat que el compost era químicament idèntic a la urea, un compost orgànic que hi ha a l'orina.

La química ha estat una gran força impulsora que ha fet possibles grans canvis al llarg dels segles XIX i XX. L'elevada producció d'amoníac, àcid sulfúric, ciment, ferro, alumini, drogues, fibres, tints, polímers, plàstics, productes derivats del petroli, etc. ha canviat el món. La química ha impulsat moltes economies. L'any 1947, en ple apogeu de la química, es va descobrir el transistor, la base de l'electrònica i la computació modernes. Més tard vingué el circuit integrat, que va revolucionar encara més l'electrònica de consum i la informàtica. Així va nàixer l'era de la física.

A pesar dels progressos, continuàvem sense entendre el meravellós fenomen de la vida. Però en 1944 les coses havien avançat fins al punt que Erwin Schrödinger va escriure *Què és la vida?* Aquest assaig històric presentava un argument convincent a propòsit que tots els fenòmens de la vida a escala cel·lular podrien ser part d'una cadena ininterrompuda de l'explicació, per confluïr finalment en la mecànica quàntica (de la qual Schrödinger va ser un dels principals impulsors). Nou anys més tard, Francis Crick i James Watson descobriren l'estructura de l'ADN, basant-se en les mesures de difracció

de raigs X de Rosalind Franklin. Les portes a la comprensió de la vida es van obrir de bat a bat.

Quan jo estudiava a l'escola, recorde que el meu professor de Biologia explicava les quatre propietats que fan que els éssers vius siguem diferents dels éssers inanimats. Les propietats eren organització, metabolisme, reproducció i irritabilitat. Organització significa que els organismes tenen una estructura interna complexa, que està formada per cèl·lules, i que, al seu torn, aquestes cèl·lules tenen també la seua pròpia estructura interna. El metabolisme fa referència al consum d'aliments per al creixement i l'activitat. La reproducció és un procés biològic que permet crear noves criatures. I la irritabilitat fa referència a la reacció d'un individu enfront dels estímuls negatius, que va des de l'acció conscient dels éssers humans fins als tropismes de les plantes.

Una cosa que no ens explicava, potser perquè es tractava només d'un curs introductori, era com totes aquestes propietats són el resultat de les activitats de les màquines moleculars. La vida és un fenomen molecular, un fenomen en la nanoescala. I algunes nanomàquines complexes, com ara els ribosomes, són capaces de crear noves nanomàquines. Des d'aquell 1953 hem progressat molt en la resposta a aquell interrogant etern. Avui sabem què som, almenys des del punt de vista biològic!

De la mateixa forma que hi va haver una era de la física, de la química, moltes persones prediuen que la pròxima era serà la de la biologia i els materials. Però en aquesta era és molt probable que siguin els punts de contacte entre les diverses disciplines, més que no les disciplines mateixes, els que més contribueixen al desenvolupament. Estem davant

d'una convergència científicotecnològica que en serà el motor impulsor. I aquesta convergència s'hi produeix en la nano-escala. Els àtoms són els maons bàsics i l'element comú de tot allò que ens envolta, tant de la matèria viva com de la inerta. Per això la nanotecnologia –enginyeria a escala atòmica– persegueix el control i la manipulació de la matèria a escala nanomètrica.

1

CAP AL NANOMÓN

Imagine dissociar un cos humà en els blocs fonamentals que el formen. Ens hi trobaríem una part considerable de gasos, principalment hidrogen, oxigen i nitrogen; quantitats importants de carboni i calci; fraccions petites de diversos metalls com el ferro, el magnesi o el zinc; i traces molt menudes de molts altres elements químics (vegeu la taula 1.1). El cost total d'aquests materials seria inferior al d'un parell de sabates. Tan poc valem els humans? Òbviament no, sobretot perquè és la disposició d'aquests elements i la forma com estan units allò que permet als éssers humans menjar, parlar, reproduir-se, pensar o escriure aquest llibre.

Taula 1.1. Composició química aproximada d'un cos humà de 70 kg.

Element	Símbol	Nombre d'àtoms	Element	Símbol	Nombre d'àtoms
Hidrogen	H	$4,22 \times 10^{27}$	Cadmi	Cd	3×10^{20}
Oxigen	O	$1,61 \times 10^{27}$	Bor	B	2×10^{20}
Carboni	C	$8,03 \times 10^{26}$	Manganés	Mn	1×10^{20}
Nitrogen	N	$3,9 \times 10^{25}$	Níquel	Ni	1×10^{20}

Calci	Ca	$1,6 \times 10^{25}$	Liti	Li	1×10^{20}
Fòsfor	P	$9,6 \times 10^{24}$	Bari	Ba	8×10^{19}
Sofre	S	$2,6 \times 10^{24}$	Iode	I	5×10^{19}
Sodi	Na	$2,5 \times 10^{24}$	Estany	Sn	4×10^{19}
Potassi	K	$2,2 \times 10^{24}$	Or	Au	2×10^{19}
Clor	Cl	$1,6 \times 10^{24}$	Zirconi	Zr	2×10^{19}
Magnesi	Mg	$4,7 \times 10^{23}$	Cobalt	Co	2×10^{19}
Silici	Si	$3,9 \times 10^{23}$	Cesi	Ce	7×10^{18}
Fluor	F	$8,3 \times 10^{22}$	Mercuri	Hg	6×10^{18}
Ferro	Fe	$4,5 \times 10^{22}$	Arsènic	As	6×10^{18}
Zinc	Zn	$2,1 \times 10^{22}$	Crom	Cr	6×10^{18}
Rubidi	Rb	$2,2 \times 10^{21}$	Molibdé	Mo	3×10^{18}
Estronci	Sr	$2,2 \times 10^{21}$	Seleni	Se	3×10^{18}
Brom	Br	2×10^{21}	Beril·li	Be	3×10^{18}
Alumini	Al	1×10^{21}	Vanadi	V	8×10^{17}
Coure	Cu	7×10^{20}	Urani	U	2×10^{17}
Plom	Pb	3×10^{20}	Radi	Ra	8×10^{10}

Total = $6,71 \times 10^{27}$

«Carbó i diamants, arenes i xips d'ordinador, càncer i teixit sa: al llarg de la història, les variacions en la disposició dels àtoms ha distingit les coses cares de les barates, les malaltes de les sanes. Ordenats d'una forma, els àtoms formen el sòl, l'aire i l'aigua; ordenats d'una altra forma, les fruites madures. Ordenats d'una manera formen llars i aire fresc; ordenats d'una altra, cendres i fum.» Així començava Eric Drexler el

llibre *Màquines de creació* de l'any 1986. Efectivament, el valor no és en els mateixos àtoms, sinó en la seua disposició. Seria, per tant, meravellós, disposar d'una tecnologia que ens permetera moure els àtoms, ordenar-los segons la nostra voluntat. La nanotecnologia és la tecnologia que ho fa possible. És una enginyeria a escala atòmica i molecular.

La nanotecnologia deu el nom a una unitat de longitud, el nanòmetre. Com ja hem esmentat, el nanòmetre (nm) és la milmilionèsima part del metre. Resulta difícil imaginar quantitats tan menudes, però cal que fem un esforç. Imaginem una circumferència especial, un meridià de la Terra que passa per París i pels dos pols. Si dividim la longitud d'aquesta circumferència en deu milions de parts, n'obtenim el metre. Aquesta és, precisament, una de les definicions de metre. Bé, ara hem de dividir el metre encara més, no en deu milions de parts sinó en mil milions de parts. Hi trobarem, aleshores, el nanòmetre. Efectivament és una quantitat molt menuda. En aquest diminut territori habiten els àtoms i les molècules.

En una definició més ampla, la nanotecnologia abasta qualsevol branca de la tecnologia que fa ús de la nostra capacitat de controlar i manipular la matèria en escales de longitud compreses entre 1 nm i 100 nm. Com podem desenvolupar aquesta tecnologia? Podríem intentar duplicar, a un escala més petita, els principis que han resultat encertats per als èxits de l'enginyeria a escala macroscòpica? O hauríem de tractar de copiar la forma com treballa la Biologia?

En la nanoescala, les lleis de la física es manifesten de forma diferent i sorprenent. Seria encertat explorar el funcionament de la biologia cel·lular i comprendre com les diferents eleccions que ha seguit l'evolució han estat condicionades

per les lleis de la física en la nanoescala. És aleshores que descobrirem els principis que cal seguir a l'hora de dissenyar sistemes sintètics que persegueixen algunes de les mateixes finalitats que les màquines nanobiològiques.

Nano i natura

És possible abordar la nanociència i la nanotecnologia des de diferents aproximacions. Però en aquest primer capítol d'aproximació al nanomón hem volgut que la natura hi tinguera un protagonisme destacat. L'home ha après molt de la natura però, així i tot, les seues tècniques de fabricació són primitives i l'eficiència d'aquestes tècniques encara està molt lluny de la que aconsegueix la natura. Per exemple, no hem aconseguit assolir el rendiment de la fotosíntesi a l'hora d'emmagatzemar energia. La lluernia produeix llum freda amb un malbaratament d'energia quasi nul, mentre que una bombeta incandescent convencional malbarata fins al 98% d'energia en forma de calor. No hi ha cap fàbrica que purifiqui i emmagatzeme l'aigua tan eficaçment com les síndries. I aquests només són alguns exemples.

Continuem amb el nostre examen crític. El cervell d'una persona pot, en principi, emmagatzemar i processar més informació que els ordinadors actuals. És improbable que una càmera de vídeo capture imatges amb més nitidesa que l'ull humà. Els receptors olfactius del gos són molt més sensibles que els que hem estat capaços de desenvolupar, tot i que s'han aconseguit espectaculars detectors moleculars. L'escarabat *Melanophila*, que pon els ous en fusta cremada de fa poc,

posseeix un detector biològic de la radiació infraroja que emet la fusta en aquestes condicions i la percep a desenes de quilòmetres. Els últims sistemes d'alarma resulten primitius si els comparem amb el sisé sentit dels animals. Bé: la natura realitza totes aquestes funcions sense cap ostentació, des de temps immemorials i d'una manera precisa, una vegada i una altra.

Continuem rebaixant el nostre ego. La nostra tecnologia actual encara no ha assolit un rendiment òptim en la captura i conversió de l'energia. Els sistemes fotovoltaics més avançats del mercat converteixen la llum en energia només amb un 16% d'eficiència. Els nostres millors motors de combustió interna treballen amb un rendiment que està al voltant del 52%. Mentre cuinem, utilitzem el 38% (en el millor dels casos) de l'energia tèrmica produïda pel gas. Però el nostre cos aprofita quasi tota l'energia química que produeix, com les plantes o els bacteris. Si fórem tan ineficients com un motor elèctric necessitaríem consumir molt més de menjar del que ingerim avui i no hi hauria aliments suficients per a tots nosaltres.

La natura, en conjunt, fixa entre 110 i 120 mil milions de tones de carboni cada any gràcies a la fotosíntesi. Nosaltres, els humans, només emetem 0,65 milers de milions de tones de diòxid de carboni a través de la respiració. Però les emissions de carboni degudes a l'activitat humana constitueixen al voltant de 8 mil milions de tones, el 77,5% de les quals són degudes, exclusivament, a la combustió de combustibles fòssils. Al llarg d'aquest procés, produïm molts altres residus, com ara fum, compostos orgànics complexos i òxid de nitrogen. Evidentment, les tecnologies que hem desenvolupat

són molt menys respectuoses amb el medi ambient que no les que operen en la natura.

Per assolir aquestes proeses, la natura ha estat treballant des de fa molt de temps en la nanoescala. Tretze mil vuit-cents milions d'anys de R+D+I, des d'aquell primer moment en què va ocórrer la Gran Explosió, l'avalen. No és estrany que en tot aquest temps la natura haja tingut l'oportunitat de realitzar molts assajos que han fet que només els millors sobrevisquen al pas del temps. Tampoc no ens ha de sorprendre que haja buscat solucions enginyoses. Pensem, per exemple, en les partícules de magnetita (Fe_3O_4) de dimensions nanomètriques, fabricades pels bacteris *Magnetospirillum magnetotacticum*. Aquests bacteris fabriquen partícules amb una morfologia específica, capaç d'induir propietats magnètiques. Aquest magnetisme actua com una mena d'imant que ajuda els bacteris a trobar una direcció favorable per al seu creixement.

La natura també ens proporciona valuoses lliçons d'economia. La formació d'una síndria és més complexa que el més complex dels circuits integrats, però costa molt menys. En definitiva, tots aquests exemples posen també de manifest que només és possible assolir una major eficiència i rendibilitat si seguim les passes de la natura.

Nano: el principi

Com hem vist en l'apartat anterior, la natura ha estat el primer nanotecnòleg i continua sent el nanotecnòleg per excel·lència. Però molt abans que s'hi albirara el potencial de

la nanotecnologia i que s'encunyara aquesta paraula, moltes de les tecnologies i dels processos desenvolupats per la humanitat es basaven en la manipulació de la matèria en la nanoescala, fins i tot sense que en fórem conscients. Mirem, per exemple, la invenció de la tinta pels egipcis o el descobriment del sabó. Hi ha hagut molts altres nanoproductes al nostre voltant. Remuntem-nos en el temps fins al segle IX, quan els habitants de Mesopotàmia utilitzaven nanopartícules metàl·liques per a obtenir un efecte brillant en la terrissa. O pensem en Faraday, quan va preparar or col·loïdal (partícules diminutes d'or dissoltes en aigua) en 1856 i s'hi va referir com a *metalls dividits*. Efectivament, l'or metàl·lic, en dividir-se en fines partícules de dimensions compreses entre 10-500 nm, pot dissoldre's en l'aigua. Viatgem ara a 1890, any en què el bacteriòleg alemany Robert Koch va descobrir que alguns compostos d'or inhibien el creixement dels bacteris. Això li va proporcionar el premi Nobel de Medicina l'any 1905.

En realitat, l'ús de l'or en preparacions químiques, tampoc no és nou. En el mètode medicinal indi conegut amb el nom d'Ayurveda s'utilitza l'or per a diferents aplicacions. Una de molt popular es denominava Saraswatharishtam i es prescrivia per millorar la memòria. S'afegia a certes preparacions medicinals per a nadons, amb l'objectiu de millorar-ne la capacitat mental. Tots aquests preparats utilitzaven or molt finament. El metall també s'utilitzava amb finalitats medicinals a l'antic Egipte, concretament per a la cura de les dents. A Alexandria, els alquimistes desenvoluparen un potent elixir col·loïdal denominat *or líquid*, un preparat que pretenia retornar la joventut. D'altra banda, el gran alquimista i fundador de la medicina moderna, Paracels, desenvolupà molts

tractaments efectius a partir de minerals metàl·lics, entre els quals hi havia l'or. Tot i que inconscientment, aquests progressos incorporaven or o compostos de l'or de les mateixes dimensions nanomètriques.

L'or col·loïdal també s'ha incorporat a gots i gerros per donar-los color. La mostra més antiga és la copa de Licurg, del segle IV dC, dissenyada pels romans. La copa es veu roja amb llum transmesa (si la font de llum és a l'interior) i verda amb llum reflectida (si l'origen de la llum és a fora). Anàlisis químiques modernes han demostrat que el cristall no és gaire distint al que utilitzem en l'actualitat. Per tant, què contribueix a donar aquest color al vidre? Conté quantitats molt baixes d'or (al voltant de quaranta parts per milió) i de plata (al voltant de 300 parts per milió), en forma de nanopartícules.

Un discurs mític

A pesar d'aquestes conquestes, la ciència va tardar a adquirir plena consciència del gran potencial de les escales petites de la matèria. Hi ha qui diu que la història va començar el 29 de desembre de 1959. Aquella nit, Richard Feynman, que havia de rebre el premi Nobel de Física en 1965 pel seu treball en física teòrica, va pronunciar un discurs davant d'un grup de persones que pertanyien a l'elit de la física dels Estats Units. Als 41 anys ja havia adquirit una gran reputació i estava considerat, a escala mundial, com el posseïdor d'una intel·ligència científica sorprenent, creativa i gens convencional. Una vegada més, va sorprendre el públic. Com un rector

des de la trona, va començar el discurs: «Hi ha molt d'espai ací dins: una invitació a endinsar-nos en un nou camp de la física».

Avui, aquell discurs es considera doctrina i es percep, de manera errònia, que va ser fonamental, mentre que el mateix Feynman és considerat el pare de la nanotecnologia. La història diu que, inspirats per les sàvies paraules del mestre, els físics es llançaren a l'exploració de les intimitats de la matèria, d'on va emergir el camp de la nanotecnologia. La realitat és ben diferent. A pesar del gran prestigi de què ja gaudia Feynman, les seues paraules d'aquella nit causaren ben poc d'entusiasme. I, al llarg dels anys següents, l'impacte del discurs no va créixer, sinó que va ser oblidat. El discurs de Feynman només es va fer famós als anys 90, quan Eric Drexler el va desenterrar per donar suport a les seues idees.

Tot i així, Feynman mereix un reconeixement per haver reconegut la importància de la miniaturització i per assenyalar la necessitat d'explorar les parts més minúscules de la matèria. És cert que, com alguns altres grans científics, va ser un visionari que no només va resoldre problemes, sinó que va saber elegir quins problemes calia resoldre. Però, què va dir exactament Feynman aquella nit? «M'agradaria descriure un camp on s'ha fet molt poc però on, en principi, s'hi poden fer moltes coses... Un camp que tindria moltes aplicacions tècniques... Vull parlar-los del problema de manipular i controlar coses a una escala molt menuda... A dins, hi ha un món extraordinàriament petit...» foren algunes de les seues paraules.

Fascinat pel potencial de les coses menudes, es preguntava: «Què passaria si poguérem col·locar els àtoms un a un de la

forma que volguérem?» Plantejava també la possibilitat d'emmagatzemar informació en uns pocs centenars d'àtoms –avui sabem que fins i tot amb un sol àtom n'hi hauria prou. «Per què no poder escriure els 24 volums de l'*Enciclopèdia Britànica* al cap d'una agulla?» I també va voler mostrar-nos la natura com un camí que calia seguir. «Moltes de les cèl·lules són molt menudes, però molt actives; fabriquen diverses substàncies, es mouen, s'agiten i fan tota mena de coses meravelloses en una escala molt reduïda. Pensem en la possibilitat de construir una cosa diminuta que faci allò que nosaltres desitgem: poder fabricar un objecte que maniobre a aquesta escala!»

En el transcurs de la intervenció va afirmar que «els principis de la física, fins on podem saber, no descarten la possibilitat que es puguin manipular les coses àtom a àtom». En certa forma, va suggerir el plantejament d'anar de baix cap a dalt. D'una forma semblant a un obrer de vila, que a partir dels maons pot fer un edifici, l'aproximació *bottom-up* planteja la construcció de nous materials a partir del reordenament d'àtoms i molècules. Mitjançant aquesta tècnica es podrien construir materials a la carta, amb propietats controlades i amb finalitats específiques.

Però el món hagué d'esperar molt de temps a col·locar els àtoms al lloc adequat. En 1981 es va construir el microscopi d'efecte túnel i més tard es van desenvolupar una sèrie d'eines denominades, en conjunt, microscopis de sonda d'escombratge. En apartats posteriors examinarem aquestes tècniques i algunes altres que ens permeten submergir-nos en el nanomón, veure i manipular la matèria a escala atòmica i molecular.