



ENTROPÒLEGS

Claudi Mans i Teixidó

Departament d'Enginyeria Química i Metal·lúrgia
Universitat de Barcelona

ENTROPÒLEGS I ENTROPOLOGIA

Un **entropòleg** és el que sap **entropologia** –paraula que m'acabo d'inventar– que és la ciència que estudia tot allò relacionat amb l'**entropia**.

No, no paris de llegir ja, lector. Ja sé que aquest terme provoca nusos a la boca de l'estómac i et recorda aquells exàmens. Però a veure si avui, havent acabat de llegir aquest article –perquè espero que l'acabaràs llegint tot– acabes essent un expert entropòleg. Així quan el teu fill/filla, o nét/neta et digui «Papa/mama/avi/àvia, què és l'entropia? El/la profe ens ho ha explicat però no he entès res» tu li podràs dir, almenys, alguna cosa comprensible i sensata.

Comencem pel començament. En Clausius va escriure dos importants articles, el 1850 i el 1865¹. En aquest segon article introdueix el concepte d'entropia. De fet, no es deia Clausius, sinó Rudolf Julius Emanuel Gottlieb (Köslin, Prússia –actualment Koszalin–, Polònia 1822 - Bonn 1888). Va agafar el sobrenom de Clausius, un nom llatí, seguint un costum de certs ambients científics centreeuropeus. El seu primer treball científic, la seva tesi doctoral (1848), va ser una explicació –equivocada²– del per què el cel és

blau, però es torna vermell a la sortida i a la posta de sol. Devia estar enamorat, tot i que no es va casar fins el 1859. I alguns anys després ens surt amb l'entropia, quins tombs dona la vida. Pel seu primer treball sobre termodinàmica, el 1850 el van fer professor associat de la Reial Escola d'Artilleria i Enginyeria de la Universitat de Berlín. Sí, Artilleria i Enginyeria. Un clàusius és també una unitat de la mesura de l'entropia, que equival a 1 kcal/K.

Entropia (έντροπία) vol dir, en grec, «gir cap enrera». Però en Clausius no pensava en girar enrera. Els conceptes amb els que treballava eren dos: el *contingut de treball i de calor* d'un cos, que es denominava *energia* des de Carnot i Joule, i un concepte nou inventat per ell –hi ha qui diu que basat en suggeriments de Lord Kelvin–, que deduïa del cicle de Carnot i que n'hi deia *contingut de transformació*. En Clausius, fill d'un pastor protestant molt coneixedor dels clàssics, era de l'opinió de que els conceptes físics importants havien de tenir noms derivats del grec. I com que en grec *transformació* és ηντροπη, es va inventar *entropia* per similitud amb *energia*. En l'article original no explica el perquè va designar aquesta magnitud amb la lletra **S**, però va ser decisió de Clausius mateix. De fet va proposar primer el símbol **S** i després la paraula.



Rudolf Clausius.

L'Emili Vallès en el seu *Diccionari Pal·las. Diccionari Català Il·lustrat*³, de 1927, inclou el terme *entropia* amb la següent definició: «Canvi en la valoració de l'energia». No és una definició excessivament

¹ «Über die bewegende Kraft der Wärme» i «Über verschiedene für die Anwendung bequeme Formen der Hauptgleichungen der mechanischen Wärmetheorie», als *Annalen der Physik und Chemie* (79, 368, 500, i 125, 353).

² Va agafar com a base de l'explicació la reflexió i la refracció de la llum, però el fenomen és degut a la dispersió, com va demostrar en Thomson (Lord Kelvin).

³ Aquest diccionari conté al final una sensacional «Terminologia tècnica d'ús en aeronàutica, ciències físico-químiques, electricitat, electrònica, ràdio, submarinisme, televisió, etc., etc.» (sic).

aclaridora, però es va mantenir fins a la darrera edició d'aquest diccionari, el 1962, ja mort l'autor. En Vallès⁴ era llicenciat en ciències físico-matemàtiques per la Universitat de Barcelona, i va acabar la carrera el 1901. Del seu expedient acadèmic, que he consultat, no es pot deduir si li van explicar l'entropia. Probablement sí, perquè si no, no s'entendria com és que incloïa el terme al diccionari, però jo crec que no va acabar d'entendre'n el significat.

En Pompeu Fabra (Gràcia 1868 - Prada de Conflent 1948), al seu *Diccionari General de la Llengua Catalana* de 1932 també hi inclou el terme *entropia*. La definició no és precisament brillant, tampoc: «*Funció termodinàmica*». En Fabra era enginyer industrial i havia donat classes de química a Bilbao. Però, amb la definició del seu diccionari, no crec que entengués tampoc el què és l'entropia.

En canvi, el diccionari de la *Real Academia Española de la Lengua* no inclou el terme *entropía* fins a l'edició de 1970, més de cent vint anys després que s'inventés la paraula. Van esperar molts anys a que un acadèmic s'hi atrevís, no ho devia tenir clar ningú...

DE LA NECESSITAT D'INVENTAR L'ENTROPIA

Lector, saps què és l'entropia?

—La S.

Sí, la S, ho has llegit abans. Però, què és la S, ja saps el que et pregunto, no fugis d'estudi. M'ho podries explicar?

—La veritat és que no me'n recordo gaire...

No és qüestió de recordar res. Si et pregunto què és la calor o el treball, alguna cosa m'explicaries, no? No és que hagis de recordar, són conceptes que tens, que has

assumit. I l'entropia, si et pregunto què és l'entropia, no et ve res al cap?

—El grau de desordre.

No està mal, per començar. No és prou exacte, però alguna cosa hi ha de veritat. Però aquesta idea es va incorporar més endavant, jo t'estic preguntant per aquella entropia relacionada amb la calor, el cicle de Carnot, etc...

—Res, d'això sí que no recordo res, només recordo que ho fèiem a termo. Encara no sé com vaig aprovar. Escolta, no ens sortiràs ara aquí amb aquelles integrals i equacions diferencials plenes de trampes. Plegaré de llegir immediatament, eh?

No, home, pots veure que al llarg de l'article només hi ha algunes equacions elementals, no pateixis. Però, per què dius «*plenes de trampes*»?

—Sí, hi feien sortir un diferencial de calor que deien que no era realment un diferencial i hi posaven un signe de *d* trencadeta, aquesta *đ*, que deien que era petit com un diferencial *d* però que no en tenia les propietats.

Això recordes? Si fa més de trenta anys!

—Sí, la ciència no la recordo, però recordo perfectament quan m'han pres el pèl.

Et confesso una cosa. Jo tampoc entenia què era, què és l'entropia. I, malgrat això, aquí em tens ara pontificant. De fet, allò que em va obrir els ulls, va ser adonar-me que **l'entropia no era una cosa que es pogués entendre**. No per complicada. No per abstracta. És que calia canviar el significat del verb *entendre*.

A veure si ens entenem. Prova d'explicar una cosa de química que entenguis. Que l'entenguis bé.

—Bé, la neutralització, per exemple. Tenim una cosa àcida, per exemple clorhídric, que conté ions H^+ . I agafem una dissolució bàsica, que conté ions OH^- , per exemple de sosa càustica, i els hacs i els ohacs s'uneixen i formen aigua, desapareix l'excés d'hacs que feien que allò fos àcid, i queda tot neutre.

No està malament, tampoc. Una visió simplista, parcialment errònia...

—Escolta, un respecte, que fa trenta anys que no en parlava, jo, de tot això...

... visió una mica antiga, del temps d'Arrhenius, li van donar el Nobel de química el 1903... Però bé, és una visió que a grans trets segueix sent vàlida, almenys per a dissolucions aquoses diluïdes, i ens permet fer càlculs i prediccions.

Però, si et pregunto, per què una cosa amb H^+ és àcida, què em diries?

—No tens pietat de mi, eh? Primer es va definir que una cosa és àcida quan té gust agre, quan fa tornar vermell el paper de tornasol, etc. I després es va veure que totes les coses que tenien H^+ es comportaven com els àcids naturals, etc. Si ja t'ho saps, per què vols que t'ho expliqui?

Doncs perquè vull que segueixis el camí de la progressiva abstracció. Efectivament, ets capaç d'explicar-ho. Per a tu el concepte H^+ és alguna cosa, un objecte físic

⁴ Parlo amb familiaritat de'n Vallès perquè era oncle del meu sogre, en Raimon Vallès (Barcelona 1907-1993). N'han fet una biografia recent: *Emili Vallès i Vidal (Igualada 1878 - Barcelona 1950) Filòleg i matemàtic*, en commemoració del 125è aniversari del seu naixement. L'autor és Xavier Pedraza, i el llibre s'ha editat a la col·lecció *Catalans il·lustres* n. 16 (ed. Dept. de Presidència de la Generalitat de Catalunya i l'Ajuntament d'Igualada. 224 pàg.).

ben real, encara que no l'hagis vist mai. I OH^- també. I saps que no és el mateix H_2 que 2H i que 2H^+ . Encara més, inclús ens en podem fer una imatge mental, com boletes que topen i es bescanvien electrons, etc.

I si et pregunto sobre l'energia? La pots visualitzar? Què em diries, d'entrada?

—Bé, l'energia és una mica més abstracta. Però ens la imaginem quan veiem que hi ha aigua acumulada a un embassament, que al caure fa rodar una roda que fa electricitat, que escalfa una estufa o fa anar l'ordinador amb el que estàs escrivint tot això.

Bé, molt bé. Ens imaginem un flux d'alguna cosa —immaterial— que primer era allà dalt acumulada amb l'aigua, després la veiem en l'aigua en moviment, en la roda que gira, en els fils de l'electricitat —que piquen si els toques, allà hi ha alguna cosa...— i finalment en la llum i la calor de la bombeta. L'energia canvia d'expressió, però ens ho imaginem. És com si canviéssim una vaca per or, l'or per dòlars, els dòlars per euros, i els euros per una entrada al cinema. Sempre anem tenint alguna cosa valuosa. Seguim tenint una cosa valuosa, plaer, informació, però ja no la podem, en principi, convertir totalment en or novament, i menys en vaca.

Però, i l'entropia? L'entropia no la veiem, no la notem, no la visualitzem... Sí, tot allò del desordre. Però jo crec que ens imaginem el desordre, no l'entropia que té associada. De l'entropia, la majoria dels humans no en tenim experiència personal, no la veiem ni la imaginem, no en tenim cap referent físic, quotidià.

I és que l'entropia és un invent. De fet, tots els conceptes científics són invents: conceptes que s'han inventat per tal de descriure i mesurar un determinat fenomen, un determinat comportament. I quan

dic «tots els conceptes» vull dir «tots». La massa, la temperatura, la velocitat, la densitat. Aquests són conceptes lligats a l'experiència directa, a la vida, als nostres sentits. L'energia cinètica, l'energia potencial, l'acceleració, el treball, el potencial elèctric, i tants d'altres, són ja més abstractes, però encara en tenim un referent experimental immediat. Però n'hi ha d'altres, més abstractes encara, que no els podem relacionar amb una experiència directa: El potencial químic, la densitat de probabilitat, el cosinus de φ , el vector de Poynting... entre altres coses que ens havien explicat.

—Verge santa, això m'he sabut?

Suposo. Ens passa com a les matemàtiques. Els números naturals, 1, 2, 3..., tots els entenem. Els enters, -3, -5, els racionals, 0,334, -5,62, etc., també. Els irracionals, l'arrel quadrada de 2, e , π , $2^{1/3}$, els acceptem, els arribem a visualitzar, la calculadora els redueix a decimals amb més o menys precisió. Ens els imaginem posats sobre la recta numèrica, una recta amb punts separats —els nombres naturals— que s'estén cap a l'altre costat del zero amb els nombres negatius, i entre enter i enter hi ha els decimals, que són infinits, i que la anem dividint en trossets cada cop més petits, i entre un punt i un altre hi caben infinits irracionals, etc. Tots junts són els nombres reals. Però els nombres imaginaris i els complexos, com el $4+2i$, aquests no ens els podem imaginar, per més que sapiguem que $i^2 = -1$, tot i que en sabem resoldre problemes.

—Ho feia, però no ho entenia...

És el que t'estic dient. Aquests tipus de conceptes, per comprendre'ls —per provar de comprendre'ls— el primer que cal és **comprendre per què s'han inventat**. No és qüestió d'entendre-ho en el sentit habitual de la paraula, sinó comprendre que s'han hagut d'inventar per resoldre determinats tipus de problemes. Però no ens ho

podem imaginar en termes d'objecte tocable.

Amb l'entropia passa el mateix. És un d'aquells conceptes dels que primer cal comprendre **per què el necessitem**, quina falta ens fa. I comprendre això no és fàcil. A veure si ho aconseguim. Per intentar-ho, haurem de comprendre les penúries d'un astronauta que...⁵

L'ASTRONAUTA AL QUE LI QUEIEN LES COSES A TERRA

Els viatges intergalàctics requeriran que les naus surtin de la Terra sense tripulants. Els tripulants naxeran a l'espai a partir de fecundacions in vitro controlades, ja ho has vist a les pel·lícules. Tot això mentre no es desenvolupa el transport d'objectes tipus *Star Trek*, cosa que s'està intentant, i no és ciència ficció⁶. Bé, imaginem un astronauta que ha nascut a l'espai, i resulta que a la seva nau s'ha espatllat el dispositiu de gravetat simulada, i que no té experiència de la gravetat⁷.

⁵ Els contes d'astronautes que transcorren en el futur no han de començar dient: «Una vegada hi havia...», sinó «Probablement una vegada hi haurà...»

⁶ El llibre *The physics of Star Trek*, de Lawrence M. Krauss (Harper Perennial, New York, 1996) és un llibre científic, no de ciència-ficció, prologat per Stephen Hawking, on, entre molts altres temes, es fa una anàlisi del què seria realment el teletransport: o transportar *realment* la matèria, o simplement transportar la informació i, amb aquesta informació, reconstruir la matèria *allà* amb materials d'*allà*. Aquesta segona opció s'està estudiant científicament, l'objectiu ara per ara és transportar electrons...

⁷ Espero que el lector tingui clar que en una nau orbitant un planeta hi ha gravetat, el que passa és que també hi ha una força centrífuga de la mateixa magnitud i tot plegat porta a una situació d'*ingravedesa* aparent, on els cossos *floten*.

Aquest astronauta arriba a un món amb gravetat, i té la sorpresa d'experimentar en carn pròpia el camp de forces gravitatori. Per rutina, deixa anar el transmissor de ràdio a l'aire creient que s'aguantarà allà, però li cau a terra i se li trenca. Comença malament. Dedueix que l'aire no aguanta els transmissors, i que alguna cosa hi ha que fa moure els objectes. Agafa un altre transmissor –una espècie de cilindre allargat–, i el prova de deixar a una superfície llisa –que nosaltres sabríem que és horitzontal– i allà veu que queda estabilitzat. Dedueix –erròniament– que les superfícies llises no deixen que els objectes es moguin. Diposita el transmissor sobre una altra superfície llisa del seu voltant, que nosaltres sabríem que és inclinada, i lògicament el transmissor rodola i cau a terra, i es trenca també. Malament. Dedueix que no és el fet que la superfície sigui llisa el que sosté els cossos. Decideix d'investigar-ho una mica millor, perquè si segueix així es quedarà sense transmissors...

Ja té clar que tot cau a terra quan ho deixa anar a l'aire. Ara vol trobar una regla mitjançant la qual sàpiga si un objecte deixat sobre una superfície plana es mourà o no. Per deduir-ho, farà un experiment. Posarà una bola dins d'un tub recte, i experimentarà si es mourà d'un extrem a l'altre o no. Observa que a vegades es mou i a vegades no, i veu que seria convenient de tenir una magnitud que, un cop mesurada, li permetés predir el moviment de la bola.

Com que veu que més avall de terra les boles no passen, pensa que seria una bona idea agafar el terra com una espècie de referència. Se li acut que les posicions relatives dels punts extrems del tub són significatives, i per això intenta assignar a cada punt un valor respecte a la referència, el terra. I d'aquest valor en diu **alçada**, que decideix de representar per **h**. Defineix l'alçada d'un punt com «la menor distància entre el punt i el terra».

I finalment troba la llei que buscava. Defineix la variació d'alçada Δh com la diferència entre l'alçada de l'extrem B on no hi ha la bola, h_B , i l'alçada de l'extrem A on inicialment hi ha la bola, h_A :

$$\Delta h = h_B - h_A$$

I descobreix les regles del moviment de la bola:

- Si $\Delta h = 0$, la bola no es mou d'allà on està. Si la canviem d'extrem sense tocar el tub, es quedarà allà on la deixem.
- Si $\Delta h < 0$, sempre la bola es mou espontàniament d'A cap a B.
- Si $\Delta h > 0$, mai la bola va espontàniament d'A cap a B. I si la movem mecànicament fins a l'extrem B, la bola es mourà espontàniament de B cap a A.

Hem trobat, doncs, una magnitud, l'alçada, que és funció només de la posició del punt, i que ens per-

met predir cap on anirà la bola dins d'un tub recte.

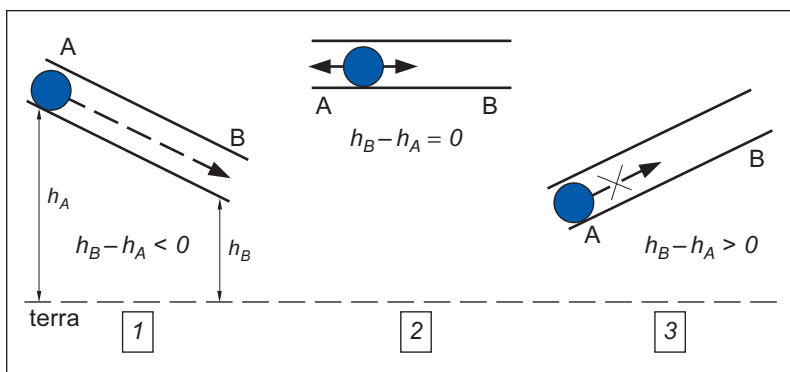
I si no és una bola? I si és una superfície llisa oberta? I si és una superfície rugosa? I si no és una superfície plana sinó ondulada o amb canvis bruscos d'inclinació? La llei anterior no s'aplica, és molt més complicada, ens hauríem d'inventar conceptes nous, com el fregament, fer més experiments, etc. I, amb tot aquest bagatge, l'astronauta arribaria a poder predir si un objecte abandonat en el camp gravitatori es mourà o no. Això que per a nosaltres és evident, per a una persona sense la nostra experiència i vivències pot requerir-li un seriós esforç de deducció i de càlcul.

L'ENTROPIA

Què té a veure tot això amb l'entropia? Ja ho he explicat, el primer que cal fer per comprendre l'entropia és veure la necessitat d'inventar-ne el concepte. Aquí és on apareix la genialitat de Clausius.

Imagina't un ocell tancat a una campana hermètica, imagina-t'ho només. Al cap d'un temps es moriria, se li acabaria l'aire. La massa total del sistema aire més ocell es manté. I, si la campana és ben aïllada tèrmicament, també l'energia del sistema es conserva: són les lleis experimentals de Lavoisier i Joule. Aquestes lleis són simètriques en el temps. La conservació de la massa i de l'energia s'aplicarien tant si el procés té lloc en el sentit natural com si tingués lloc en sentit invers, en què un ocell mort i aire enrarit evolucionessin cap a la resurrecció de l'ocell i la formació d'oxigen a l'interior de la campana.

És ben evident que hi ha processos espontanis i altres que no tenen mai lloc. Per exemple, a l'obrir una vàlvula d'un cilindre d'aire a pressió el gas flueix cap a l'exterior, però mai s'ha vist que l'aire penetri espontàniament a un cilindre buit i es comprimeixi espontàniament.



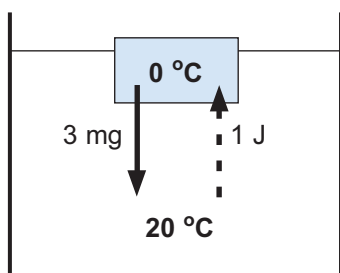
Procés espontani (1), reversible (2) i impossible (3).

Clausius vol poder predir si un sistema evolucionarà i en quina direcció. I per això li fa falta definir, inventar, una nova magnitud. A aquesta magnitud característica del sistema, que denomina **contingut de transformació o entropia, S**, li imposa aquestes condicions:

- En un procés espontani, com els processos naturals, $\Delta S > 0$.
- En un procés que estigui en equilibri, que ja no evolucioni $\Delta S = 0$.
- Els processos que no es donen espontàniament han de tenir $\Delta S < 0$.

És a dir, s'està inventant una magnitud que en la naturalesa creixi sempre, i que sigui precisament aquest creixement el que ens indiqui el sentit de l'evolució natural, la **fletxa del temps**, com algú n'hi ha dit. Els processos que estudiava Clausius eren processos tèrmics, de bescanvi de calor, i per això les formes inicials de les magnituds i equacions relacionades amb l'entropia es van fer relacionant temperatures i quantitats de calor transferides.

Imagina que tirem un glaçó de gel a 0 °C a un whisky que està a 20 °C. El whisky cedeix calor al glaçó, que comença a fondre's. Imagina que, en un primer instant, li ha cedit 1 joule, que evidentment ha guanyat el gel, del qual se'n fonen uns 3 mil·ligrams, és fàcil de calcular-ho. Si dividim la calor transferida pel valor de la temperatura a que s'ha rebut o s'ha cedit (usem la temperatura en kèlvins, per evitar valors negatius), tindrem:



Inici de la fusió espontània d'un glaçó.

Per al gel:

$$\frac{1 \text{ J}}{273 \text{ K}} = 0,00366 \frac{\text{ J}}{\text{ K}}$$

Per al whisky:

$$\frac{1 \text{ J}}{(273 + 20) \text{ K}} = 0,00341 \frac{\text{ J}}{\text{ K}}$$

Com és natural, sempre és més gran el valor absolut del quocient que correspon a la substància que rep la calor, perquè està a menys temperatura, i la temperatura és al denominador.

Doncs bé, en Clausius denomina **canvi d'entropia d'un objecte (ΔS)**, al quocient entre l'energia guanyada per un objecte (ΔQ) i la seva temperatura (T), en kèlvins:

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$$

El **canvi d'entropia global de l'univers ($\Delta S_{\text{univers}}$)** serà la suma dels canvis d'entropia de l'objecte fred i del seu entorn calent:

$$\begin{aligned} \Delta S_{\text{univers}} &= \Delta S_{\text{objecte}} + \Delta S_{\text{entorn}} = \\ &= \frac{\Delta Q}{T_{\text{freda}}} - \frac{\Delta Q}{T_{\text{calenta}}} \end{aligned}$$

El signe negatiu és degut a que l'entorn **perd** energia. Com que el valor numèric de la temperatura calenta T_c és sempre superior al de la temperatura freda T_f , el valor global de $\Delta S_{\text{univers}}$ és superior a 0. Així doncs, hem inventat –bé, Clausius inventà– una magnitud que satisfà el que li demanàvem: és superior a 0 en els processos espontanis.

No cal dir que això també seria igual si tinguéssim un objecte calent que es refredés, cedint calor a l'entorn. Si les temperatures de l'objecte i de l'entorn fossin iguals, el canvi d'entropia global seria zero.

Estarien en equilibri tèrmic, i no es transferirien calor.

A partir d'aquí, ve la termodinàmica clàssica i ho formalitza tot, amb equacions ben fetes, integrals, estudi de tots els casos: sistemes no isoterms, canvis de fases, reacció química, etc. Però l'origen, la base, és la necessitat d'inventar-nos una funció que creixi en els processos espontanis.

Abans de tancar aquest punt, però, val la pena indicar que en els canvis d'entropia sempre parlem d'increments, però que no ens referim gairebé mai a valors absoluts de l'entropia. Passa com l'alçada, sempre ens referim a valors relatius referits al nivell del mar, o el nivell del terra. Passa el mateix amb l'energia: repassa la lliçó *La gasolina ens costarà un ronyó* (NPQ núm. 403, 2001). També t'anirà bé donar una ullada a la lliçó *Els captaires de la tomba d'Haji Ali* (NPQ núm. 399, 2000).

IRREVERSIBILITAT I REVERSIBILITAT

La irreversibilitat ens la trobem per tot arreu. A les *Coplas de don Jorge Manrique por la muerte de su padre*, cap al 1476, ja ho tenia ben clar. Llegim-lo, o escoltem-lo en la veu de Paco Ibáñez⁸:

*Los placeres e dulçores
desta vida trabajada
que tenemos
non son sino corredores
e la muerte, la çelada
en que caemos,*

*Non mirando a nuestro daño
corremos a rienda suelta
syn parar;
des que vemos el engaño
e queremos dar la buelta
non ay lugar.*

⁸ Recordo com si fos ara un recital que va fer a l'aula magna de la universitat, cap allà al març o abril del 1968...

Irreversibilitat total i absoluta. I insuperable, per ara⁹.

Avui dia, aquesta por a la irreversibilitat segueix ben present, però no ens agrada. A en Jorge Manrique (Paredes de Nava 1440 - Castillo Garci-Muñoz 1479) tampoc li devia agradar, però ell ho assumia amb resignació, com tothom fins fa quatre dies. Però ara esmercem molt temps, molts diners i molta recerca a introduir reversibilitats a la vida, per tal d'assolir seguretats i deixar poc marge a l'atzar. Els lligaments de trompes, que siguin reversibles. La vasectomia, que sigui reversible. Els pits de silicona, que siguin desinflables. Els tatuatges, que siguin esborrables. Certes mares menopàusiques volen tenir fills. La Viagra es ven com l'aigua. «*Envejecer, ¿te lo puedes permitir?*» deia fa uns anys un anunci de cosmètics per a mascles. Avui ens rebel·lem contra el determinisme de la irreversibilitat.

És una mica difícil imaginar-se el concepte de procés reversible, no hi estem acostumats. De fet, un procés reversible autèntic, en termodinàmica, és aquell que té lloc a una velocitat infinitament petita i amb canvis pràcticament imperceptibles en cada moment, de manera que, veient el procés, no poguessis decidir si va en un sentit o en un altre. Els anoracs reversibles són aquells que els gires i torna a sortir un altre anorac diferent, però no té res a veure aquesta reversibilitat amb la reversibilitat termodinàmica. Aquí el concepte és més difícil de visualitzar.

El Sears, el millor llibre de termodinàmica elemental que he tingut, posava un exemple aclaridor: imaginem que hem d'escalfar una substància de 20 a 40 °C. Per fer-ho reversiblement necessitaríem una sèrie infinita de banys termotàtics de gran capacitat, cada un dels quals a una temperatura infinitèssimament més alta que l'anterior; el primer a 20 °C i el darrer a 40 °C. I es tractaria d'anar escal-

fant el nostre matràs posant-lo successivament a cadascun dels banys. Del primer sortiria a 20, del segon a 20,0000001, del tercer a 20,0000002... Els banys, com que són grans, no es refredarien pràcticament. Amb aquest sistema, a part de perdre la paciència, la salut i la vida –duraria un temps infinit– aconseguiríem escalfar la substància tal com volíem, i l'entropia de l'univers no creixeria pràcticament gens.

Doncs bé, molt a prop de cadascú podem trobar exemples de quasi-reversibilitat: les actuals relacions de parella. Cada cop més la relació de moltes parelles sembla una mica el procés de reversibilitat descrit pel Sears. De fet, en la relació de moltes parelles hi ha ara més estadis que mai, i progressivament es va assolint un compromís més intens i profund. Però es té majoritàriament assumit que en qualsevol moment de la relació es pot tirar enrera, i aparentment amb menys cost personal, econòmic i psicològic. Això en teoria, perquè a la pràctica jo diria que el cost és similar a abans. De fet, no és que es tiri enrera de forma reversible, no es desfà el camí recorregut, sinó que simplement s'abandona el camí.

ESTADI	SITUACIÓ
0	Cap relació
1	Relació d'amistat
2	Relació promíscua esporàdica
3	Relació monògama esporàdica
4	Relació monògama estable
5	Parella convivint esporàdicament
6	Parella de fet sense papers
7	Parella de fet amb papers
8	Matrimoni civil i/o religiós

Taula 1. Nivells creixents de força de l'enllaç de parella.

Hi ha alguna relació entre reversibilitat i estabilitat? Quant més reversible el camí de la parella, més estable? Però no, no deu ser tan fàcil. No sé què en diuen els psicòlegs i els sociòlegs, però jo crec que el grau d'estabilitat que s'assoleix en una relació de parella, entre molts altres factors, és proporcional als esforços, els diners i el temps inver-

tits conjuntament en l'adquisició o la consecució de béns valuosos i indivisibles, com un habitatge o un fill. I això, al marge de a quin estadi de la relació s'estigui. Però aquest és un tema que caldria deixar per a una altra lliçó, i no precisament de química... De fet, ens estem sortint de la termodinàmica clàssica, una ciència fenomenològica, que no entra en els aspectes moleculars, ni en teoria cinètica, ni en enllaços, ni en matrimonis, ni en parelles de fet ni de dret.

ENTROPIA I DESORDRE

Va ser Ludwig Boltzmann (Viena 1844 - Trieste 1906) qui va fer el genial lligam entre la termodinàmica clàssica i l'estructura molecular de la matèria. La seva famosa equació relaciona l'entropia S amb el grau de desordre W , que té a veure amb el nombre de molècules existents en el sistema, i amb el nombre diferent de combinacions en que les podem trobar, molt o poc barrejades. La lletra k és una constant numèrica denominada *constant de Boltzmann*, i no és casualitat, és realment d'ell.

$$S = k \log W$$

Estava tan satisfet d'aquesta equació que se la va fer posar a la

⁹ Manuel Sacristán (Madrid 1925 - Barcelona 1985), professor de la UB, va ser un important teoritzador marxista i segueix sent un dels fonaments intel·lectuals de bona part del moviment comunista actual, que malgrat que no aparegui als diaris com a tal no vol dir que no existeixi. En algun article dels anys 70 apuntava que una de les missions de la ciència en la lluita contra les limitacions de la naturalesa és l'assoliment de la immortalitat. Això, que en el seu moment semblava una *boutade*, és el que per la via dels fets estan perseguint la biologia i la medicina modernes dels països capitalistes. Vegeu una síntesi del pensament de Sacristán a *M.A.R.X.* (2003), ed. El Viejo Topo, Barcelona, recopilació de Salvador López Arnal.



Ludwig Boltzmann.

tomba, al cementiri de Viena. Un bon pitafi. No la comentarem aquí, però sí que hem de parlar d'un punt important i font de males interpretacions.

La idea d'una relació entre l'entropia, l'espontaneïtat d'un procés i el grau de desordre, està ben establerta, és simple i quasi intuïtiva. Però estrictament errònia. Per què? Perquè sempre ens fixem només en el tros de procés que observem, i no acostumem a fixar-nos en l'entorn, tan important com el propi procés observat. Al Dr. Castells –vegeu la bibliografia adjunta– sempre li ha semblat increïble que no es destaqués més aquesta qüestió, i té raó. Diguem només, sense explicar-ho, que en una reacció química hi ha quatre termes entròpics a tenir en compte a l'hora de predir l'espontaneïtat d'una reacció:

- El canvi d'entropia degut al propi canvi químic.
- El canvi d'entropia degut al diferent volum que poden ocupar les molècules a mida que la reacció avança. Si es forma un gas, per exemple, els productes tenen més entropia que els reactants.
- A l'entorn hi ha també un canvi de la seva entropia. Si l'entorn cedeix energia al sistema per via tèrmica, l'entorn es refreda, i per tant l'entropia de l'entorn disminueix.
- I, a més, hi ha l'entropia que es genera pel fet que els reactants es barregen amb els productes: l'entropia de barreja.

És la suma de totes quatre contribucions el que s'ha de mirar. És la suma total la que ens dirà si el sistema evolucionarà, en quin sen-

tit i fins quant. Sí, això és més complicat, i no ho explico. Però és que això ja és tota una altra lliçó, i ja no és una **lliçó d'estar per casa...**

•••

Bé, després de llegir aquest article ja no se't pot aplicar la frase de C. P. Snow¹⁰. En un famós llibre va afirmar que «no conèixer la segona llei de la termodinàmica és com no haver llegit res de Shakespeare».

—Ah, sí! Que emocionant quan diu tu bi o not tu bi amb una calavera a la mà, oi?

No exactament. En Hamlet, quan deia això no portava cap calavera a la mà. Al cap sí, al cap hi duia la seva.

BIBLIOGRAFIA

- Albalat, Rosa (2000). *Termodinàmica aplicada*, Ed. Universitat de Barcelona, col. UB Manuals n. 38. 415 pàg. Bon llibre de text aplicat.
- Asimov, I. (1956). *The Last Question*. Potser el millor dels contes curts de l'autor. Pot trobar-se a Internet, per exemple a www.maddad.org/asimov01.htm.
- Astarita, Gianni (1989). *Thermodynamics, An Advanced Textbook for Chemical Engineers*, Plenum Press, New York. 444 pàg. Excel·lent llibre de nivell avançat.
- Atkins, P. W. (1984). *The Second Law*. Trad. espanyola *La Segona Ley* (1992), Prensa Científica, Barcelona. 230 pàg. Un dels millors llibres de divulgació, amb idees pròpies genials.
- Boltzmann, L. (1886). *La segunda ley de la teoría mecánica del calor*. Conferència inclosa al llibre *Escritos de mecánica y termodinámica*. Trad. (1986) Alianza Editorial col. El libro de bolsillo n. 1173. 225 pàg. Els articles originals més filosòfics.
- Brillas, E.; Bastida, R. M.; Centellas, F.; Domènech, X. (1992). *Fonaments de Termodinàmica, Elec-*

troquímica i Cinètica, Ed. Universitat de Barcelona i Barcanova. 432 pàg. Bon llibre de text bàsic.

Carnot, S. (1824). *Reflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*. Trad. (1987) Alianza Editorial, col. Ciències n. 505. 140 pàg. Reflexions bàsiques sobre els fets inicials que permeteren desenvolupar la termodinàmica.

Carnot, S.; Clausius, R.; Kelvin, L. *Escrits fonamentals sobre el segon principi de la termodinàmica*, Eumo Editorial, en col·laboració amb Pòrtic i l'Institut d'Estudis Catalans. 200 pàg. Diversos escrits fonamentals dels autors bàsics.

Castells, J. (1987). *Reencuentro con la entropía*, Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid, LXXXI, quadern 2n. pàg. 353-376. Una reivindicació dels químics i de la termodinàmica química.

Castells, J. (1991). *En busca de un lenguaje químico correcto*, Memorias de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona, tercera època, n. 891, vol L n. 9, pàg. 375-388. Id. a l'anterior.

Curado, E. M. F.; Tsallis, C. (1991). *Generalized statistical mechanics: connection with thermodynamics*, J. Phys. A 24, L69. Correccions: 24, 3187 i 25, 1019 (1992). Una mostra de que la termodinàmica clàssica es pot enfocar amb perspectiva moderna.

Sears, F. W. (1952). *An introduction to Thermodynamics, the Kinetic Theory of Gases and Statistical Mechanics*. Trad. (1959) *Termodinàmica*, Ed. Reverté, Barcelona. 378 pàg. El millor llibre de text de termodinàmica que he tingut a les mans. ☺

¹⁰ En Charles Percy Snow (Leicester 1905 - Londres 1980) és l'autor de l'assaig *The two cultures and the scientific revolution*, de 1959, on descriu el fenomen de la progressiva separació entre els dos mons de la cultura humanística i de la cultura científica.