

# La persistència de concepcions acientífiques alternatives en els estudiants de física

Hernando Rayo Calleja \*

Institut de Batxillerat "Infanta Isabel d'Aragó", Barcelona

## Ensenyar física: una feina difícil

Les diferències evidents entre els objectius que un equip docent o un professor individual volen assolir i els èxits educatius que efectivament aconseguen són una de les preocupacions més grans dels professors. Una preocupació que és particularment aguda entre els professors de física, que veuen any rera any com la seva matèria és considerada una de les més dures i que cada cop presenta nivells més alts de fracàs escolar. Tanmateix, no es pot dir que sigui el fracàs escolar l'únic indicador de les diferències entre objectius proposats i èxits assolits. Fins i tot entre els alumnes que ofereixen un rendiment escolar acceptable i acaben amb èxit l'ensenyament secundari és possible de constatar una assumpció inadequada dels objectius proposats, especialment en el moment que es descontextualitzen els mètodes i objectius de l'activitat escolar ordinària i s'intenten aplicar a situacions de la vida quotidiana, en àmbits no estrictament escolars.

Tot això origina una certa situació d'incomoditat, i fins i tot de crisi, en els professors de física, els quals a vegades arriben a posar en qüestió tant la seva competència professional com les estratègies i metodologies que utilitzen, i, fins i tot, arriben a preguntar-se sobre el sentit i la utilitat de l'ensenyament de la física a nivell elemental.

Són moltes les variables a tenir en compte en l'aprenentatge significatiu dels alumnes, i les seves relacions a vegades no són evidents. És per això que l'ofici d'ensenyar ciències comporta una dificultat intrínseca, que té el seu origen tant en la possible complexitat estructural de la disciplina com en la complexitat dels esquemes mentals dels alumnes, manta vegada ben contraposats als del professor. Aquesta dificultat comporta l'exigència d'obligar el docent a emmarcar la seva acció dins d'un esquema teòric determinat del qual ha de sorgir necessàriament una metodologia didàctica específica. I és en aquest punt on la investigació en didàctica de les ciències en general (i de la física en particular) adquireix

rellevància especial. Són aquest tipus d'investigacions les que han portat cap a noves perspectives didàctiques en les quals l'alumne apareix com a origen, subjecte i objecte final de l'acció docent, perspectives en les quals el paradigma de l'activitat d'ensenyament-aprenentatge deixa d'estar centrat exclusivament en el professor o en l'ensenyament per desplaçar-se cap a l'alumne i cap als processos d'aprenentatge.

## Les concepcions científiques dels alumnes

En intentar classificar les idees que normalment apareixen en les investigacions sobre didàctica de les ciències se'n poden fer dos grups que, a vegades, són presentats com si fossin antagonics.

### Punt de vista estàtic

Està emmarcat en el paradigma piagetian. Segons aquesta visió, la inadequació entre els objectius programats i els efectivament assolits s'origina en una programació inadequada de continguts i en una elecció incorrecta de l'opció metodològica a seguir en l'ensenyament. Des d'aquest punt de vista el problema rau en l'existència d'un desfasament entre els objectius que es programen i el nivell cognitiu dels alumnes.

Aquesta definició del problema comporta unes certes claus per a la seva possible solució: caldria associar millor els nivells que es demanen als estudiants en les diverses matèries objecte de l'ensenyament als nivells piagetians on es troben en cada moment els possibles alumnes.

Amb aquest teló de fons s'obre més d'un camí per a la investigació didàctica: d'una banda, els intents d'establir, amb tot el rigor que sigui possible, els mètodes que ens haurien de permetre de fixar els nivells piagetians —amb totes les matisacions i perfeccionaments que s'hi vulguin introduir— d'àmplies capes de la població escolar; d'altra banda, intentar precisar quins són els requisits cognitius mínims necessaris per a l'adequada comprensió dels diversos punts del currículum.

Si uns processos d'investigació didàctica com els apuntats en el paràgraf anterior arribessin a fi de bé, el resultat seria, en tot cas, una seqüenciació temporal de continguts, i del nivell amb què es presenten, formulada en paral·lel a la seqüenciació temporal que determina

\*Hernando Rayo Calleja és llicenciat en Física per la Universitat de Barcelona. Ha estat professor de les Universitats de Barcelona i Autònoma i actualment és catedràtic de Física i Química a l'IB "Infanta Isabel d'Aragó", de Barcelona.

—sota la perspectiva piagetiana— el desenvolupament cognitiu de la població escolar.

### Punt de vista dinàmic

Aquest corrent d'idees té en compte els punts de la visió estàtica, però no s'acontenta amb uns resultats que es limitin a classificar els alumnes (i el currículum) en successius estadis cognitius. Els objectius de les investigacions didàctiques que agrupo en aquest segon bloc són dinàmics en la mesura que en les investigacions s'indaga com aconseguir que l'alumne progressi, amb la més gran agilitat possible, des del seu estadi cognitiu a un altre de superior. La fita a aconseguir és que l'alumne assolixi un determinat nivell de pensament formal i científic en la disciplina considerada, tot i que s'accepta que un alumne pugui presentar en una determinada disciplina formes de pensament típicament formals i, en una altra i simultàniament, trobar-se en estadis cognitius inferiors. S'admet també que un alumne pugui romandre estancat en el temps, per a determinades activitats, sense progressar-hi en el sentit piagetian.

Podríem considerar que el punt de partida d'aquest corrent d'idees es troba en els treballs d'Ausubel. Aranca de la constatació d'una sistemàtica persistència d'errors conceptuals que semblen molt arrelats en els alumnes. Errors que es mantenen, a vegades, amb independència dels nivells operatoris —en el sentit de Piaget— assolits i dels tipus d'activitats d'aprenentatge que se segueixen. Dit d'una altra manera: la capacitat operatòria formal no sembla que sigui una condició suficient (tot i que s'accepta com a necessària) per a l'adquisició de coneixement científic.

El que es diu fins aquí obliga a una investigació en profunditat sobre l'estructura cognitiva de l'estudiant, amb caràcter previ al disseny de les estratègies didàctiques. Ausubel ho diu molt clarament quan afirma que *si em possessin en situació d'haver de reduir tota la psicologia educativa a un sol principi, enunciaria aquest: averigüeu que és el que l'alumne sap, i ensenyeu en conseqüència.*

De fet, la visió dinàmica arrenca també de l'epistemologia genètica de Piaget, on es mostra un cert paral·lelisme entre el procés d'evolució històrica d'una ciència i el d'adquisició de les idees corresponents per part d'un alumne. Si bé aquest paral·lelisme ha estat qüestionat, es manté i s'accepta la idea que, de la mateixa manera com passa en una comunitat científica, l'estudiant posseeix un munt de creences estructurals (paradigma) en el marc de les quals va fent seves les noves dades i coneixements que adquireix, de manera que l'existència d'aquests marcs conceptuals previs són un element de referència propi de cada alumne, tot i el seu caràcter alternatiu al marc que té la ciència de per si o, si més no, el professor que l'ensenya.

Amb independència de quin sigui l'origen, *els marcs alternatius dels alumnes són autèntiques organitzacions*

*mentals que l'individu imposa per damunt de les seves experiències sensorials posteriors, organitzacions que es posen en evidència en les respostes que dóna a situacions problemàtiques particulars, d'acord amb la definició proposada per Driver i Ericson.*

I quines són les característiques fonamentals d'aquests esquemes alternatius? Driver, Guesne i Tiberghien n'aporten algunes, que podríem resumir en:

- Són vertaderes estructures mentals, o models, que tenen un elevat nivell de coherència interna individual basada generalment en l'experiència sensorial pròpia prèvia.
- Tenen un evident caràcter general en la mesura que en molts individus diferents (en edat i en nivell d'instrucció) es poden trobar esquemes similars.
- Són molt persistents. Se suposa que la causa de la seva resistència a ser modificats està relacionada amb la forma com s'han originat.
- El posseïdor d'aquestes estructures s'expressa mitjançant un llenguatge constituït per una barreja de termes imprecisos i termes clarament diferenciats que, en conjunt, responen a idees no prou explícites en el subjecte.
- Actuen, generalment, com a fre epistemològic i conceptual a la instrucció, tot i que no és possible d'atribuir només a l'existència d'aquestes estructures prèvies totes les dificultats dels alumnes en l'aprenentatge de les ciències, i que no s'han d'oblidar altres fonts de dificultat com ara el llenguatge específic de la disciplina científica considerada, els aspectes afectius i d'altres relacionats amb el procés o el contingut de la instrucció.

L'estudi de la incidència dels esquemes conceptuals en l'èxit de la instrucció és tota una línia d'investigació sobre la naturalesa d'aquests esquemes, sobre el seu origen i especificitat, i també sobre les metodologies didàctiques que puguin tenir en compte l'existència d'uns tals esquemes alternatius. Aquesta línia d'investigació se centra en el fet de concebre el desenvolupament del pensament natural de l'estudiant, es fonamenta en les nocions constructivistes de Kelly i considera l'alumne com a científic i artífex constructor del seu propi aprenentatge. Sota aquesta perspectiva, i tenint en compte la idea —ja clàssica— que *tot sovint s'adquireix coneixement en contra de coneixements anteriors*, s'ha anat desenvolupant tota una línia d'investigació sobre les concepcions científiques dels alumnes tant de caràcter general com en relació específica a l'elaboració de models per a la instrucció (Carascosa et al., 1985).

## Persistència dels esquemes alternatius científics

Com ja s'ha dit, una de les característiques dels esquemes alternatius dels alumnes és la seva persistència, persistència que sembla ser resultat d'unes formes de raonament en física característiques del que D. Gil anomena *metodologia de la superficialitat*. El fort arrelament d'aquests esquemes o concepcions és una conseqüència de la seva impermeabilitat a les estratègies didàctiques poc adients (però molt freqüents), cosa que fa que els esquemes alternatius es vagin propagant des de nivells elementals de l'ensenyament fins a nivells més avançats, en els quals s'esperaria —a la vista dels continguts ensenyats i suposadament assimilats— que ja haguessin estat desplaçats per altres de més correctes d'acord amb els supòsits de la física.

Si bé aquesta pervivència d'esquemes es manifesta en tots els camps de la física, és a la Mecànica on prenen una rellevància especial, especialment si es té en compte el seu gran pes en els currículums de física i l'elevada sensació de *crònic fracàs* en el seu ensenyament, sensació que s'estén tant a la dimensió conceptual com a la de mètodes i procediments. Fracàs, en definitiva, que sembla tenir el seu origen tant en la proximitat quotidiana dels problemes que es formulen a la Mecànica com en la forta correlació formal existent entre les lleis de Newton.

Alguns temes, extrets de la investigació didàctica en física, permeten apreciar la persistència de concepcions i metodologies científiques en bona part dels alumnes.

### “El moviment implica una força”

Davant de situacions on hi ha un moviment, el principi causal posat entre cometes a l'inici d'aquest paràgraf es presenta, per a molts alumnes, com una llei alternativa fortament arrelada a tot nivell. En plantejar un problema de llençament vertical d'un objecte, o el d'un llençament parabòlic a la superfície de la Terra, la inclusió de forces inexistents en la direcció del moviment és sostinguda per un alt percentatge de les persones enquestades en els estudis corresponents, i això amb independència del seu nivell d'instrucció. Per exemple, hi ha investigacions que mostren resultats que van des del 98% d'arguments erronis en el sentit indicat entre alumnes de tercer curs de BUP fins al 70% per a graduats universitaris en física o en química, amb percentatges intermedis trobats en mostres d'alumnes de COU i de primers cursos universitaris de ciències.

Una anàlisi més detallada d'estudis d'aquest tipus mostra que la força fictícia (que actuaria cap amunt en la pujada del cos) *va disminuint a mesura que el mòbil s'acosta al punt més alt de la trajectòria. En arribar-hi, s'anul·la, i a continuació s'inverteix i va cap avall, i augmenta d'intensitat d'acord amb la progressió del mòbil en la seva baixada*. Les respostes, tanmateix, semblen emmarcar-se en un context semblant al de la teoria medieval de l'ímpetus més que no en un context típicament

aristotèlic; i si bé la idea que trasllueix sembla reflectir un fort principi de tipus causal, de fet aquest principi es mostraria d'una forma només parcialment causal, ja que no s'atribueix cap causa al fet que la força *es gast*i en la fase de pujada i es torni a generar, en sentit contrari, a mesura que el mòbil baixa. Aquesta constatació ens mostraria un exemple de la metodologia de la superficialitat abans esmentada.

### La ignorància sistemàtica de la força centrípeta

Tots els professors de física som conscients de les dificultats que s'han d'enfrontar quan s'intenta fer entenedora als alumnes la dinàmica del moviment circular. A tall de mostra de la poca eficàcia dels propòsits del professor davant de les idees o esquemes previs dels alumnes, diversos autors han analitzat les respostes donades per grups d'alumnes a la qüestió *¿per què la Lluna no cau sobre la Terra?*

El moviment circular uniforme és una aproximació al moviment que té la Lluna entorn de la Terra. Des d'una certa perspectiva, un principi de conservació —el del moment angular respecte del centre de la Terra— és, d'alguna manera, una condició d'equilibri. Condició d'equilibri que és parcial, atès que, en última instància, ha de ser considerat com un equilibri dinàmic diferenciat de l'equilibri típicament cinètic en la mesura que aquest darrer respon a una llei de conservació diferent, com és la del moment lineal.

Doncs bé: les justificacions errònies (89% a tercer de BUP, 88% a COU, 82% entre alumnes d'últim curs de facultat de ciències i 58% entre llicenciats) es basen en un 85% dels casos en mecanismes de compensació de forces, d'acord amb la taula 1.

Des d'un punt de vista conceptual, les respostes evidencien una confusió o identificació entre els dos tipus esmentats d'equilibri. Des d'un punt de vista dinàmic mostren com els qui contesten ignoren les condicions inicials del moviment considerat i, en conseqüència, extrapolen a la situació real la resposta corresponent al que passaria si el cos (la Lluna) estigués inicialment en repòs, sense reconèixer la necessària existència d'una força centrípeta que, en última instància, sigui la responsable del continu canvi de direcció de la trajectòria de la Lluna.

### Circuits elèctrics

Tot i la preponderància dels estudis sobre esquemes previs a Mecànica que mostra la bibliografia sobre investigacions didàctiques, des de fa uns deu anys s'ha notat un augment de l'interès per anar comprènent els models i esquemes alternatius dels estudiants sobre el corrent elèctric en circuits senzills. Osborne ha sintetitzat els models més habituals, que són els de l'esquema representat a la figura 1.

Se suposa habitualment que el primer model infantil sobre el corrent correspon al model (a) de l'esquema —

Mecanismes de compensació / anul·lació	compensació	Per agents externs al sistema T-L	Sol altres planetes/ causes
		Per causes internes al sistema T-L	Repulsió mútua aplicació tercera lleï de la dinàmica
	Afebliment		
	Anul·lació		
Altres mecanismes	Arguments de tipus inercial	Centrípets	
		Centrifugos	
		Altres	
	Moviments naturals/substanciació de l'òrbita		
	Arguments relatius al camp gravitatori		

Taula 1: Justificacions del moviment de la Lluna entorn de la Terra

model unipolar, amb la bateria entesa com a dipòsit del fluid, el conductor com a canonada i la bombeta com a recipient receptor— i que, en acabar l'ensenyament secundari, els alumnes han assolit la *visió científica* indicada a l'esquema com a model (e).

Fins a quin punt és certa la hipòtesi anterior? Una forma de poder contrastar quin és el model que realment utilitzen els alumnes és col·locar en sèrie dues bombetes, separades per una resistència, i la pila. Les respostes mostren allò que per a alguns autors és una forma de *raonament natural* i que per a altres no és sinó un típic raonament seqüencial: *la bombeta que rep el corrent en primer lloc brilla més que l'altra perquè part del corrent es gasta a la primera bombeta i una altra part es gasta a la resistència intercalada*. La concepció d'un element passiu de circuit (bombeta, resistència,...) com a embornal -consumidor- de corrent, alimentat per una pila que és imaginada com a font de corrent de *cabdal constant*, és la que mostren el 51% dels alumnes que acaben l'ensenyament secundari, un 52% dels alumnes de primer curs de facultat -de ciències- i un 10% dels alumnes que acaben una carrera de ciències.

Curiosament, aquest últim grup d'alumnes, que respon a la mostra d'un estrat més expert que semblava haver abandonat majoritàriament els raonaments seqüencials (vegeu a l'esquema el tipus (c)), recupera aquesta forma d'argumentació davant de situacions inesperades o desconegudes, com podrien ser les de substitució de la resistència que separa les dues bombetes per una *caixa negra* que pugui contenir qualsevol element o combinació d'elements actius o passius d'un circuit. En aquest supòsit, hi ha un estudi que mostra que el percentatge d'estudiants de l'estrat expert que recuperen la forma seqüencial de raonament és del 33%, mentre que en els altres dos estrats de població estudiats es manté en els percentatges abans esmentats. El pensament seqüencial, per tant, es mostra com un esquema

alternatiu molt fortament arrelat en l'individu, que en un notable nombre de casos roman amagat darrera d'un esquema *científic* més superficial que, davant de situacions lleugerament diferents d'aquelles en què s'ha après a aplicar-lo, desplaça ràpidament.

### Reducció funcional: el cas de la termodinàmica

El comportament d'un sistema termodinàmic es descriu amb un nombre reduït de variables que representen valors mitjans o quantitats macroscòpiques i entre les quals, en les situacions d'equilibri, es poden definir relacions funcionals com ara la que representa l'equació d'estat per a un gas ideal. Això comporta a la termodinàmica la utilització de funcions de diverses variables, la qual cosa representa una dificultat per als alumnes. Tal i com ja indicava Piaget en les seves anàlisis de relacions entre espai, temps i velocitat, la resposta de l'alumne sol ser una reducció funcional, una simplificació del problema a relacions més senzilles entre dues úniques variables, a base de mantenir constants les altres o, simplement, d'ignorar-les.

En el cas de la termodinàmica, l'equació d'estat és usada pels estudiants no ja com una veritable relació funcional que ens permet predir el sentit de variació d'una de les variables del sistema quan es modifiquen les altres, sinó més aviat com una relació entre quantitats numèriques fixes: es pot calcular una de les *variables* si es coneix el valor de les altres. I això, per exemple, es detecta en respostes a qüestions com ara: *En la compressió adiabàtica d'un gas ideal, augmenten tant la pressió com la temperatura. Podeu explicar-ho a partir d'un model de partícules?* Un 50% dels enquestats —alumnes dels quatre primers cursos de facultat de ciències— donen respostes semblants a: *El volum es redueix, per tant les mol·lècules estan més pròximes entre si, per tant hi ha més xocs, i la pressió augmenta*. Aquesta resposta de mostres d'estrats ja qualificats de la població sorprèn perquè, en l'argumentació, només tenen en compte la

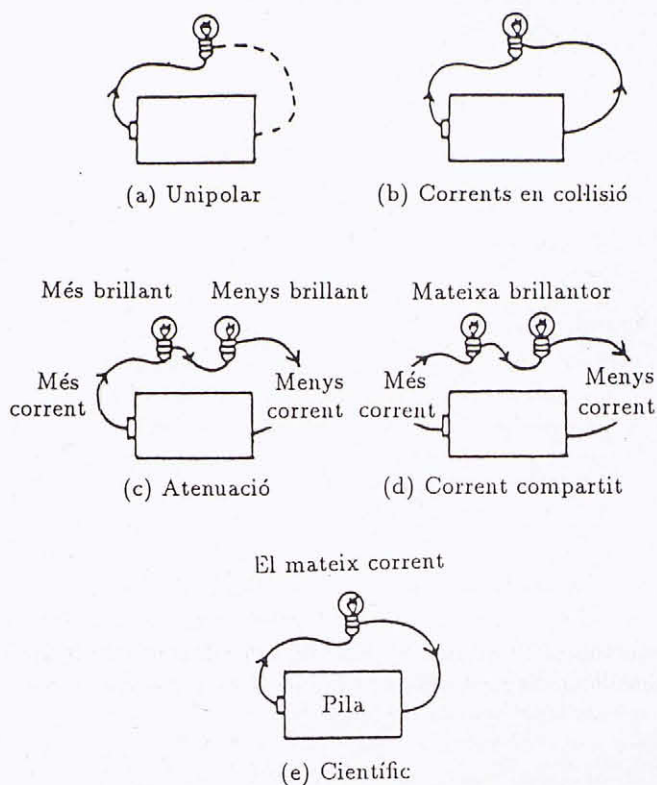


Figura 1: Models i esquemes alternatius més habituals per al corrent en circuits senzills

disminució del volum, i ignoren qualsevol altre efecte que també podria ser rellevant. La reducció funcional s'estableix, per a la pregunta i població considerades, en dues fases: de primer, augmenta la densitat; a continuació, i per causa de l'augment de densitat, creix

## Bibliografia

- CARRASCOSA, J. i GIL, D., La Metodologia de la superficialitat i l'aprenentatge de les ciències, *Enseñanza de las Ciencias*, **3**, 113-120 (1985).
- DRIVER, R. i ERICSON, G., Theories-in-action: some theoretical and empirical issues in the study of student conceptual framework, *Studies in Sci.Educ.*, **13**, 105-122 (1983).
- DRIVER, R., GUESNE, E. i TIBERGHIE, A., *Ideas científicas en la infancia y la adolescencia*, MEC-Morata (Madrid, 1989).
- GIL PEREZ, D., Tres paradigmas básicos en la enseñanza de las ciencias, *Enseñanza de las Ciencias*, **1**, 26-33 (1983).
- HIERREZUELO, J. i MONTERO, A., *La Ciencia de los alumnos*, Laia-MEC (Madrid, 1989).

la pressió. Aquestes reduccions funcionals seqüencials solen funcionar cronològicament, com és el cas.

S'ha vist, i el cas anterior n'és un exemple, que aquestes formes de raonament per reducció es manifesten tan bon punt apareixen problemes de diverses variables, i això amb una notable independència de quins siguin els continguts concrets del problema. S'han detectat problemes derivats d'aquest estil de raonament no només a la termodinàmica (on són molt típics) sinó també a la cinemàtica, a l'electrocinètica, en problemes de propagació d'ones mecàniques, etc.

## Conclusions

La comunitat docent, i, de fet, tota la societat en sentit ampli, s'acaba al desafiament de la reforma educativa. Una reforma que vol incidir en el canvi de la societat actual a partir de la seva pròpia base: l'ensenyament. La implantació d'uns plans d'ensenyament secundari generalitzats (ensenyament secundari obligatori) per a tota la població jove que haurà de ser el nucli fonamental de la societat dels primers anys del segle vinent requereix tant una renovació metodològica com d'objectius i continguts a tot l'ensenyament i, per tant, també a l'educació científica. La consideració de l'alumne com a constructor del seu propi aprenentatge requereix, en particular, que en l'acció docent es tinguin en compte els esquemes i formes de pensar i de raonar dels estudiants —generalment, i de primer, acientífics— atès que són previs al procés d'aprenentatge, a vegades són estimulats i desenvolupats pel mateix procés d'ensenyament-aprenentatge i, en tot cas, el condicionen fortament.

La persistència dels esquemes alternatius en els nivells de l'ensenyament superior, a la mateixa universitat, suggereixen, addicionalment, la necessitat de plantejaments didàctics també en aquests nivells.