



MATERIALS
244

VÍCTOR LÓPEZ-SIMÓ
DIGNA COUSO

**Didàctica de la física
per a l'educació
secundària obligatòria**



UAB

Universitat Autònoma
de Barcelona

Servei de Publicacions

VÍCTOR LÓPEZ-SIMÓ
DIGNA COUSO

Didàctica de la física per a l'educació secundària obligatòria

Universitat Autònoma de Barcelona
Servei de Publicacions
Bellaterra, 2024



Generalitat de Catalunya
**Departament de Recerca
i Universitats**

Aquest llibre ha estat publicat amb el suport
del Departament de Recerca i Universitats
de la Generalitat de Catalunya

Aquest volum es publica en el marc del grup de recerca
«Activitat Científica Escolar: Llenguatge, Èines i Contextos»
(ACELEC-ref.2021 SGR 00647, dir. Digna Couso)

Primera edició: febrer de 2024

© del text:

Víctor López-Simó i Digna Couso

© d'aquesta edició:

Servei de Publicacions de la UAB

Edició:

Servei de Publicacions

Universitat Autònoma de Barcelona

Edifici A. 08193 Bellaterra (Cerdanyola del Vallès). Spain

Tel. 93 581 10 22

sp@uab.cat

<https://publicacions.uab.cat>

ISBN 978-84-19333-82-7



Aquest llibre està publicat amb una llicència Creative Commons CC-BY-NC-ND.
El titular de l'obra autoritza a utilitzar els continguts sempre que es reconegui l'autoria.
No es permet fer un ús comercial, ni la generació d'obres derivades.

Agraïments

Als pioners i pioneres de la didàctica de la física, de qui vam aprendre que l'ensenyament de la física pot ser una experiència gratificant, professional i fonamentada en evidències, i que cada dia ens fan sentir que caminem a espatlles de gegants... i de gegantes!.

Al conjunt d'alumnat, professorat i comunitat de recerca que ens ha acompanyat en aquest procés, i ens ha fet créixer com a docents, investigadores i formadores.

*A la Marta, el Roger, el Gerard i la Juna.
Al Javi, el Martí, l'Adrià i la Bruna.*

Índex

RESUM DEL LLIBRE.....	9
CAPÍTOL 1. INTRODUCCIÓ	11
1.1. Per a què ensenyar física? Alfabetització i aspiracions científiques per a tothom	11
1.2. Com ensenyar física? La dimensió cognitiva, lingüística i social de l'aprenentatge	12
1.3. Quina física ensenyar? Els models científics escolars de la física	15
CAPÍTOL 2. ENSENYAR FORCES I MOVIMENT A SECUNDÀRIA	19
2.1 La idea d'interacció física com a intercanvi de forces.....	20
2.2. La idea d'inèrcia com a tendència a mantenir l'estat de moviment.....	28
2.3. La idea que el moviment és sempre relatiu a una referència externa	34
2.4. La idea de velocitat com a canvi de posició, i d'acceleració com a canvi de velocitat	38
Bibliografia clàssica de referència sobre forces i moviment:	44
CAPÍTOL 3. ENSENYAR GRAVITACIÓ I FLUIDS A SECUNDÀRIA	45
3.1. La idea de gravetat com a interacció entre masses	46
3.2. La idea de comportament dels fluids d'acord amb les diferències de pressió.....	53
3.3. La idea de flotació com a equilibri entre el pes i l'empenta.....	61
Bibliografia clàssica de referència sobre gravitació i fluids	68
CAPÍTOL 4. ENSENYAR ELECTRICITAT I MAGNETISME A SECUNDÀRIA	69
4.1. La idea d'interacció elèctrica com a resultat de la distribució de càrregues dels materials	70
4.2. La idea d'intensitat en un circuit elèctric.....	76
4.3. La idea d'imant i d'interacció magnètica	83
Bibliografia clàssica de referència sobre electricitat i magnetisme:.....	90
CAPÍTOL 5. ENSENYAR ONES, LLUM I SO A SECUNDÀRIA.....	91
5.1. La idea de propagació de la llum com a raig rectilini.....	92
5.2. La idea de color com a interacció entre els tipus de llum i la matèria.....	100
5.3. La idea de so com a ona mecànica.....	108
Bibliografia clàssica de referència sobre llum i so:	116
CAPÍTOL 6. ENSENYAR ENERGIA A SECUNDÀRIA	117
6.1. La idea d'energia com a funció d'estat	118
6.2. La idea de calor i treball com a mecanismes per transferir energia.....	126
6.3. La idea de conservació, dissipació i aprofitament de l'energia	132
Bibliografia clàssica de referència sobre energia:	141
REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES	143

Resum del llibre

Didàctica de la física per a l'educació secundària és un llibre orientat a la clarificació conceptual i didàctica de l'ensenyament de la física escolar durant l'educació secundària obligatòria, i va adreçat al professorat de física en formació inicial, al professorat de ciències en actiu que fa cursos de física a secundària, i a altres professionals de l'educació formal i no formal i de la divulgació científica. El llibre planteja una aproximació didàctica d'arrel socioconstructivista, i assumeix que els processos d'ensenyament i aprenentatge estan fortament condicionats per les idees prèvies de l'alumnat, que el llenguatge i la interacció són mecanismes clau per a la construcció d'idees científiques, i que la ciència escolar requereix un diàleg constant entre els fenòmens físics del nostre voltant (el que observem i mesurem) i les teories que pretenen explicar aquests fenòmens (el que imaginem i raonem). Aquest conjunt de premisses ens porta a buscar un ensenyament de la física competencial, que vagi molt més enllà de la resolució acrítica de problemes numèrics descontextualitzats, repetitius i memorístics, i que promogui una combinació de coneixements conceptuals, experimentals i epistèmics que permetin que l'alumnat compregui el món físic i l'ajudin a prendre decisions i participar de manera més raonada del món que els envolta. En aquest llibre ens centrarem principalment en aquests coneixements conceptuals, però no ho fem presentant la versió més sofisticada d'aquestes idees —com passaria si es tractés d'un manual de física per a graus universitaris o professionals—, sinó posant l'èmfasi en l'aproximació escolar a aquestes idees científiques, és a dir, posicionant-nos en quina és la «versió» de la idea científica que volem que es construeixi durant l'educació secundària. Tots els plantejaments que es presenten en el llibre estan basats en la recerca en didàctica de la física que s'ha fet arreu, tant en el nostre context local com a escala internacional.

Cada capítol se centra en l'ensenyament i l'aprenentatge de cada una de les diferents branques de la física escolar, incloent-hi la mecànica newtoniana, l'electromagnetisme, la física ondulatoria i la termodinàmica. En cada capítol es presenten les principals idees clau de la física escolar associades a cada branca, i per a cada una d'aquestes idees se segueix una mateixa estructura. En primer lloc, es comença interpel·lant el lector demanant-li que respongui a una pregunta o un repte amb l'objectiu que posi a prova les seves pròpies idees i concepcions espontànies. A continuació, s'exposa quin acostuma a ser el punt de partida de l'alumnat, és a dir, les idees alternatives i les confusions més comunes d'acord amb la recerca en educació científica. Tot seguit, es plantegen estratègies d'ensenyament i aprenentatge que inclouen una àmplia varietat de recursos didàctics, com ara experiments senzills, problemes conceptuals, simulacions virtuals, analogies, etc. Per acabar, es discuteix a quina versió de cadascuna d'aquestes idees clau pot arribar l'alumnat al final de la seva escolaritat, i com les podrà fer servir per construir explicacions per comprendre, resoldre problemes i prendre decisions en la seva vida quotidiana i professional.

Amb aquest llibre es busca establir ponts entre la recerca en didàctica de la física i la pràctica docent d'aula, que ajudin els professionals de l'educació a prendre decisions sobre la seva acció docent sobre la base del coneixement didàctic existent. Per aquest motiu, el llibre combina discussions a partir dels referents bibliogràfics clau a escala internacional amb exemples i recursos pràctics, incloent-hi extractes reals d'activitats d'aula que s'han provat i refinat en diferents centres educatius durant els darrers anys, i on es convida el lector a implementar aquestes activitats en les seves classes.

Capítol 1. Introducció

L'ensenyament de qualsevol disciplina o àmbit de coneixement requereix plantejar-se tres preguntes clau, que són la tríada de «per a què ensenyar», «com ensenyar» i «què ensenyar». La didàctica de la física en educació secundària, com a camp de recerca destinat a guiar els processos d'ensenyament i aprenentatge de física en l'etapa educativa dels 12 als 16 anys, no es pot escapar d'aquesta reflexió. La resposta a aquestes tres preguntes conforma la visió del que creiem que ha de motivar i orientar el que passa a l'aula de secundària quan volem desenvolupar en l'alumnat una nova manera de mirar el món: la mirada de la física. En aquest capítol compartim amb el lector com responem a aquestes preguntes els autors d'aquest manual, amb l'esperit de ser transparents amb la visió de l'ensenyament i aprenentatge de la física que ens defineix i que influeix en totes les reflexions, les propostes i els exemples dels capítols posteriors.

1.1. Per a què ensenyar física? Alfabetització i aspiracions científiques per a tothom

Per a què ensenyar física no és una pregunta baladí. Durant molt de temps l'ensenyament d'aquesta disciplina s'ha associat de manera elitista als nivells d'ensenyament superior per a alumnes «brillants» que seguirien estudis universitaris, assumint que calia deixar molts estudiants pel camí a fi que uns pocs poguessin arribar al cim del coneixement. Avui dia, on tant legalment com socialment no ens plantejem un ensenyament fins als 16 anys que no sigui per a tothom, continua havent-hi dubtes sobre si a tot l'alumnat li cal aprendre física. Sovint es pensa que la física no és d'utilitat directa en la vida quotidiana i no resulta interessant ni assequible per a bona part de l'alumnat. A aquesta tensió entre les dues funcions que s'atribueixen a l'ensenyament de la física avui (per una banda, que serveixi per fonamentar de manera adient estudis posteriors i, per una altra, que sigui útil i assequible per a tot l'alumnat independentment de la seva tria d'estudis o professionals futures), se li han de sumar els estereotips que afecten aquesta disciplina, particularment l'atribució d'excessiva dificultat i la vinculació amb l'excel·lència. Tot això afecta la visió de la física de professorat i alumnat i, per tant, el que acaba passant a l'aula.

Per a nosaltres ambdues funcions són compatibles a l'etapa 12-16, i justament per això defensem la necessitat d'un ensenyament de continguts disciplinaris de física per a tots i totes des de les primeres etapes educatives. Aquesta visió d'una física escolar per a tot l'alumnat, que esperem poder desenvolupar al llarg del llibre, parteix d'un doble objectiu per a l'aprenentatge de la física.

Primer, l'ensenyament de la física ha de contribuir activament a l'*alfabetització científica* bàsica del conjunt de l'alumnat, especialment aquell que no prosseguirà els seus estudis de física, amb la finalitat última de fer una aportació al seu desenvolupament personal integral i la seva contribució al conjunt de la societat en termes democràtics, culturals i socioeconòmics. Aquest objectiu, comú a tot l'ensenyament de les ciències, parteix de la consideració que les persones que posseeixen més bons coneixements i habilitats científiques tenen més capacitat d'entendre el món que les envolta i, per tant, prendre més bones decisions en diferents aspectes de la seva vida.

Així, els coneixements de la física ens poden ajudar a decidir de manera més informada, tant a nivell personal com social, sobre temes tan importants com el transport, el consum energètic o el tractament de residus, entre d'altres. A més, aquests coneixements són imprescindibles per poder fer front a teories pseudocientífiques o conspiranoiques, com el negacionisme del canvi climàtic, el terraplanisme o la preocupació

pels *chemtrails*, posant les bases amb la resta de ciències perquè l'alumnat s'allunyi del pensament místic i consideri essencial argumentar tant a partir de proves com amb raonaments fonamentats en el coneixement consensuat. Finalment, la física, com la resta de ciències, forma part del nostre patrimoni cultural, igual que l'art, la literatura o la filosofia. Les persones tenen el dret de poder consumir, gaudir i participar de la cultura pròpia de cada societat, tant respecte dels grans avenços o les revolucions conceptuals del passat com d'avui dia. De la mateixa manera que no ser expert en art contemporani no impedeix poder gaudir de la visita a un museu, no tenir coneixements profunds de física no hauria d'impedir que les persones puguem fascinar-nos davant les grans investigacions que s'estan obrint en el camí de la física actual, amb fenòmens tan icònics com els forats negres, les propietats del món nano, l'arribada a Mart, etc.

De manera compatible amb l'objectiu anterior, l'ensenyament de la física ha de servir de *porta d'entrada al món professional i acadèmic de l'àmbit científicotecnològic* (les denominades carreres STEM, per les seves sigles en anglès), i ajudar a superar les barreres associades als estereotips respecte als estudis i professionals d'aquest àmbit. Ensenyar física amb aquest segon objectiu present implica possibilitar aspiracions en aquest àmbit per part de tot l'alumnat, incloent-hi aquell alumnat que se n'allunya per motius que ens han de fer pensar: perquè creuen que *no són prou bons/bones* per a les STEM o perquè *no són com les persones* que generalment es dediquen a les STEM. Tal com la recerca ens indica, sovint la manca d'aspiracions per les professions i estudis del àmbit científicotecnològic es relaciona amb una manca de percepció d'autoeficàcia (manca de confiança en les pròpies capacitats) que es correlaciona més amb les característiques socioeconòmiques i la identitat de l'alumnat que amb les seves capacitats reals. Per exemple, l'autoeficàcia de les noies o dels alumnes en desavantatge socioeconòmic és menor que la dels seus homòlegs noi o socioeconòmicament avantatjats, particularment si aquests tenen referents familiars propers en l'àmbit STEM. De fet, quan la seva identitat (com a noia extravertida, com a jove musulmà, com a fill de pare aturat, com a discapacitat visual, etc.) no ressona amb la identitat socialment atribuïda als professionals STEM, difícilment l'alumnat pot negociar aquesta disparitat i acostuma a creure i manifestar que no li interessa allò que en realitat pensa que no és per a gent com ell o ella.

Lluny dels discursos sobre vocacions STEM, aquest segon objectiu no el vinculem a fomentar que hi hagi més professionals STEM en termes de quantitat perquè la nostra economia o societat els necessiti, sinó que no deixin d'haver-hi professionals STEM diversos per motius de manca d'inclusió, equitat i justícia social. Com a societat ens calen altres professionals STEM, que hi aportin la seva mirada idiosincràtica, crítica i alternativa a l'*statu quo*. Com a docents, forma part de la nostra tasca possibilitar que això s'esdevingui, treballar per incloure referents diversos a l'aula de física i mostrar-ne una visió humanista i no estereotipada. Prendre consciència de la masculinització històrica d'aquesta disciplina, així com de la cultura de la brillantor i excel·lència que projecta, ens pot ajudar a acostar-la a alumnes que la podrien gaudir, i potser fins i tot contribuir-hi, si no fos per això.

1.2. Com ensenyar física? La dimensió cognitiva, lingüística i social de l'aprenentatge

Com ensenyar física, és a dir, quina és la millor manera d'ensenyar física per aconseguir que l'alumnat aprengui més i millor és una pregunta que guia bona part de la recerca en didàctica de la física, com també l'evolució històrica de la disciplina. Al llarg de la seva curta història, la didàctica de les ciències ha patit diverses revolucions metodològiques, en què s'han succeït i revisitat propostes com ara l'ensenyament de les ciències per descobriment, el canvi conceptual, la introducció de la perspectiva CTS (ciència, tecnologia i societat), l'ensenyament de les ciències centrat en la indagació, o més recentment l'enfocament STEM, entre d'altres. La varietat d'aquestes propostes, sovint plantejades com a contraposició de les unes amb les altres, i particularment com a alternativa a l'ensenyament tradicional centrat en la transmissió dels continguts, ens mostra no només una diversitat de maneres de fer a l'aula, sinó també que activitats diferents poden afavorir un bon procés d'ensenyament-aprenentatge. De fet, podem trobar activitats d'aula potencialment bones i amb les quals inspirar-nos en tots aquests diferents corrents metodològics.

Llavors, què fa que una activitat d'aula sigui potencialment bona? *Com ens cal orientar l'ensenyament de la física?* La nostra postura, defugint posicions dogmàtiques i sense «casar-nos» explícitament amb cap

metodologia concreta, passa per identificar quins són els consensos sobre ensenyament i aprenentatge compartits entre àrees tan diverses com la psicologia cognitiva, l'epistemologia, la sociologia o, més recentment, les neurociències. Aquests grans consensos, amb el suport de molts resultats obtinguts de contextos molt diferents i amb mètodes de recerca també molt diversos, tot i que no predefeixen de quina manera concreta cal ensenyar, orienten quins són els elements clau de l'ensenyament a partir de com es produeix l'aprenentatge en els estudiants.

En aquest manual volem compartir tres d'aquests grans consensos:

- Aprendre és un procés cognitiu que implica partir del que saps i connectar idees.
- Aprendre ciències requereix interaccionar amb els fenòmens del món.
- Aprendre és una pràctica social que s'adquireix participant en comunitat.

1.2.1 Aprendre és un procés cognitiu que implica partir del que saps i connectar idees

Aprendre és un procés cognitiu complex que implica la connexió entre idees de naturalesa diversa i establir xarxes neuronals que permeten l'ús i l'evocació d'aquestes idees de manera eficient. Les persones expertes en una temàtica no només tenen més informació a la memòria, sinó que la tenen més ben organitzada, fet que els permet percebre i interpretar millor els fets del món, identificant patrons i estructures que els novells no perceben. És a dir, són capaces de construir coneixement a partir de la informació que els hi arriba i utilitzar aquest coneixement en noves situacions per tal d'interpretar-les i actuar.

Fa molt que sabem que el més important per construir nou coneixement és el que ja se sap, és a dir, que les nostres idees prèvies tenen una importància cabdal en el nostre aprenentatge. Aquest fet assenyala la importància a l'ensenyament de qualsevol disciplina de fer aflorar les idees dels estudiants, explicitant el que saben del fenomen que s'està estudiant. També ens assenyala la importància, per tal de millorar les idees prèvies, de trobar maneres de posar-les a prova (per exemple, a partir d'experiments, discussions i noves informacions) i promovent-ne la revisió (per exemple, comparant diferents punts de vista). Com que aquest és un procés complex (costa molt deixar de pensar com pensem intuïtivament, ja que pensar així ens havia funcionat fins al moment), el focus en l'aprenentatge profund s'ha de restringir a idees complexes i importants, que tinguin molt potencial d'aplicació. Alhora, s'ha de ser conscient que aquestes idees clau no es podran aprendre d'una vegada i per sempre: ens caldrà aprendre-les en aproximacions successives, sempre partint de la versió de cada idea que som capaços de construir en cada moment.

Aquesta visió de l'aprenentatge com quelcom extremadament profund que implica construcció cognitiva té implicacions a l'hora de pensar en com avaluar aquest aprenentatge. Tot i que no hi ha un consens sobre què i com avaluar l'aprenentatge de la física, centrar-se només en avaluar la memorització i repetició de continguts, o en l'aplicació repetitiva d'algoritmes difícilment retrà compte de l'aprenentatge profund que s'hagi produït o no. De fet, qualsevol prova d'avaluació que es dugui a terme per intentar mesurar l'aprenentatge dels alumnes conté decisions que, de manera implícita o explícita, prioritzen unes habilitats i uns coneixements per sobre d'altres. És important tenir en compte aquesta complexitat del procés d'aprenentatge per dissenyar les avaluacions de manera adequada i justa, i centrar-se en l'aplicació i transferència del que és important aprendre.

1.2.2. Aprendre ciències requereix interaccionar amb els fenòmens del món

Aprendre física vol dir aprendre a mirar i actuar sobre els fenòmens del món d'una certa manera: identificant el que hi canvia o no (variables) i observant les regularitats i singularitats del seu comportament (lleis), tot partint i/o interpretant com ha de ser el món perquè aquests fenòmens passin d'aquesta manera (teories). Per aquest motiu, els experiments són una eina fonamental en l'ensenyament de la física, ja que donen l'oportunitat d'interaccionar de manera controlada amb els fenòmens del món, i possibilitar una comprensió més contextualitzada i significativa dels conceptes, les lleis i les teories de la física.

D'altra banda, aprendre física no pot ser només aprendre les idees de la física (conceptes, teories), sinó també els processos gràcies als quals hem construït històricament aquestes idees. Introduir experiments i petites recerques a l'aula de física pot servir perquè l'alumnat comenci a entendre de primera mà com treballa la ciència i com es construeix el coneixement científic. Malauradament, sovint els experiments de l'aula es presenten com a receptes de passos a seguir, en què la funció principal és la verificació de teories o lleis ja enunciatades tot seguint els passos d'un mètode científic prototípic. Això redueix l'activitat experimental de les aules de física, quan es fa, a una mena de teatre on s'ha de seguir acuradament el guió, i ha de passar el que s'espera que hi passi.

La realitat, però, és que la física, tant l'escolar com l'erudita, no té com a objectiu descriure la realitat tal com és ni descobrir la veritat inqüestionable que s'amaga darrere dels fets utilitzant un mètode únic i infal·lible. L'objectiu de la ciència és construir descripcions i explicacions intencionals i aproximades que, encara que duradores i ben fonamentades en el que podem saber dels fenòmens del món, tenen un caràcter inherentment temptatiu. Per fer-ho, la ciència fa servir una gran diversitat de mètodes, tècniques i eines que s'hi apliquen d'una manera variada, però sistemàtica i rigorosa. L'objectiu n'és intentar minimitzar el biaix i l'error, permetre la reproductibilitat i afavorir el debat i el consens en una comunitat crítica. Així, quan els alumnes elaboren i milloren preguntes investigables, dissenyen les seves recerques, duen a terme experiments per posar a prova les seves prediccions o participen en un congrés científic escolar, és important incloure-hi la reflexió sobre la naturalesa del que estan fent, com també el reconeixement del potencial i alhora la limitació d'aquesta forma de construir coneixement que és la ciència. En fer-ho, el treball amb els fenòmens a l'aula de física els aporta aprenentatges significatius no només de ciències, sinó també sobre ciències. Des de la perspectiva epistèmica, això no només en millora la comprensió de la física, sinó que també els ajuda a desenvolupar una actitud crítica i científica enfront del món que els envolta, per tal com entenen la importància de les dades, la seva anàlisi i la seva interpretació per crear coneixement.

1.2.3. Aprendre és una pràctica social que implica la participació dels individus en una comunitat que comparteix formes de fer i de raonar

Aprendre ciències en general i física en particular és aprendre una certa forma de mirar el món, que és pròpia d'una certa comunitat: la científica. Incorporar aquesta forma de mirar el món requereix participar de les formes idiosincràtiques de fer, parlar, pensar, ser i valorar d'aquesta comunitat. És a dir, aprendre física requereix participar de les pràctiques socials, discursives i cognitives pròpies de la física, tot situant-nos en una activitat realista o versemblant que les requereixi.

Des d'aquesta visió, el llenguatge que utilitzem a l'aula de física pren una dimensió diferent. Com descrivim els fenòmens, com argumentem les nostres idees, de quina manera utilitzem la narrativa per explicar processos, com representem gràficament conceptes com les forces o com donem sentit al llenguatge matemàtic són elements clau que no només comuniquen les nostres idees, sinó que intervenen en la seva construcció. Si aprendre implica construir significats conjunts, no podem aprendre sense compartir de manera rica, detallada i multimodal les nostres idees. Això ens diu que a la classe de física cal parlar-ne, i molt, del que observem i pensem, i que el llenguatge privilegiat ha de ser el llenguatge natural de l'alumnat, com a pont a altres llenguatges.

Aquest ús del llenguatge només té sentit si és dialògic, és a dir, si es posen en contacte diferents maneres d'interpretar el món que permeten avançar. Així, ens cal plantejar activitats d'aula en què els estudiants parlin i discuteixin entre ells per resoldre problemes o qüestions, i també establir un diàleg entre docents i alumnes que vagi més enllà de fer preguntes i esperar respostes correctes. Les estratègies discursives docents han d'estar orientades a convidar a explicitar (com creus que...?), a qüestionar (i si...?) o a revisar (abans heu dit que...!) les pròpies idees, així com comparar-les entre elles i amb la veu de la ciència. Això implica anar obrint (què en penseu?) i tancant (al final, hem arribat a la conclusió que...) el discurs de l'aula, orientant la construcció d'idees des de la divergència fins a la convergència a través de la retroalimentació o *feedback* i *feedforward* docent. Així, els comentaris que els docents fan als seus alumnes, si són de qualitat i s'orienten a convidar-los a fer, pensar o parlar millor donant pistes sobre com fer-ho, és el que activa l'aprenentatge de l'alumnat.

Des d'aquesta visió d'aprenentatge situat, la contextualització també es concep amb una importància clau. Sigui en el mateix fenomen a estudiar (com ara el refredament d'un vas de precipitats ple d'aigua calenta), sigui en contextos més allunyats que el requereixen (per exemple l'aïllament tèrmic de la llar), per aprendre física significativament cal que l'activitat cognitivodiscursiva i social de l'aula de física tingui sentit més enllà d'aquesta, és a dir, en la vida real. Desafortunadament una part molt important del que passa a les classes de física només té sentit dins el mateix context escolar, per exemple estudiar per a l'examen o fer exercicis de mòbils que van de A a B perquè se'ls hi demanaran. Introduir contextos rellevants per als mateixos alumnes (per exemple, estudiem el vostre moviment quan aneu en monopatí, o investiguem sobre com es carrega o descarrega la bateria del teu telèfon mòbil) o per als que hi vegin un sentit (i si apliquem el que hem après de física a identificar quines han estat les causes d'un accident de trànsit?) dota d'un sentit d'utilitat i realitat l'activitat d'aprendre física que ens cal fer viure a l'alumnat.

1.3. Quina física ensenyar? Els models científics escolars de la física

Al nostre entendre, discutir quins continguts de física cal ensenyar està estretament relacionat amb la idea didàctica de models, de la qual en parlarem al llarg del llibre. Tot i ser un terme polisèmic, a grans trets podem definir un model com un conjunt d'idees, regles i relacions, de caire teòric i conceptual, que fem servir els humans com a representació —sempre parcial— dels fenòmens del món real per tal de poder-los descriure, predir i explicar. Hi ha moltes maneres de concebre els models, però nosaltres els acotarem parlant de models científics i models científics escolars. Així, els models científics són els models creats i usats en l'àmbit científic per raonar, per simplificar o per idealitzar fenòmens complexos, per ajudar a visualitzar entitats abstractes, per donar suport a la interpretació de resultats experimentals o per argumentar i orientar la presa de decisions. Per exemple, podem dir que els científics poden preveure l'escalfament global fent servir models científics del clima. Alhora, els models científics també es poden classificar en models teòrics o models empírics. Els primers representen objectes idealitzats (com ara les lleis de Newton), mentre que els segons són la descripció de patrons i regularitats inferides (per exemple, la llei d'Ohm).

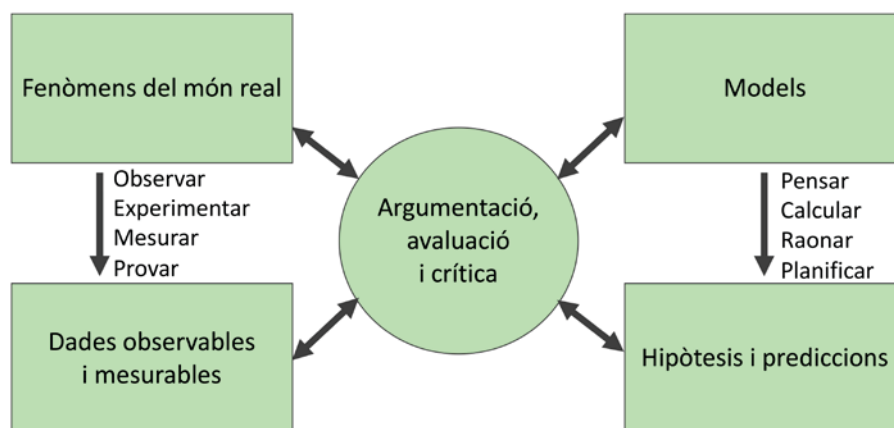


Figura 1.1. Diagrama de l'activitat científica en què la ciència es concep com el diàleg entre els fenòmens del món real i els models del món de les idees. Traduït d'Osborne (2014), prèviament adaptat de Giere *et al.* (1991).

1.3.1. Models científics escolars, models mentals i modelització

Ara bé, a l'educació bàsica no té sentit parlar dels models científics de la ciència erudita o professional, sinó que en didàctica es fan servir dos altres conceptes: els models científics escolars (MCE en endavant) i els models mentals (MM en endavant).

D'una banda, els MCE són les versions simplificades i en progressió dels models científics, adaptades a cada nivell escolar, que han de permetre a l'alumnat predir, explicar i prendre decisions d'una manera anàloga a com ho fan els científics professionals, però a través de regles de joc molt més simples i adaptades a cada nivell educatiu. A vegades els MCE també s'anomenen «models curriculars». De fet, un dels objectius dels processos d'ensenyament i aprenentatge científic, d'acord amb el que hem dit abans, hauria de ser dominar el conjunt de MCE que de manera implícita o explícita apareixen als currículums de cada legislació.

Els MCE tenen una naturalesa de caire conceptual, i inclouen el conjunt d'idees i regles del joc que permeten descriure, predir i explicar fenòmens. Per això és important distingir entre un MCE i les seves formes de representació externa. Possiblement, deus haver sentit parlar de «models» per referir-se a maquetes, dibuixos o simulacions virtuals on s'expressen fenòmens i relacions entre magnituds físiques. Per exemple, en una classe de física es pot fer servir una maqueta per explicar el moviment d'electrons dins d'un circuit elèctric, o es pot fer servir una simulació amb partícules vibrants per explicar microscòpicament el concepte de temperatura. Tots aquests exemples són representacions (materials o virtuals) que expressen alguns elements d'un model científic escolar (especialment aquells més visuals o accionables de la representació), que faciliten que l'alumnat pugui veure'ls, tocar-los o manipular-los. Ara bé, aquestes maquetes, dibuixos o simulacions no són un MCE, sinó artefactes que usem per ajudar-nos a pensar en el conjunt de regles i altres relacions i expressions que permeten explicar aquests fenòmens. Per contra, el MCE de circuit elèctric o el MCE de matèria inclouria el conjunt de regles que permeten explicar com funciona el circuit o la vibració de les partícules que componen materials a diferent temperatura.

D'altra banda, els MM són el conjunt de representacions mentals creades i usades per l'alumnat de manera espontània o induïda, els quals sovint estan influïts pel raonament intuïtiu, pel llenguatge quotidià, per condicionaments socials, etc. Sovint els MM són alternatius als MCE (fan servir regles de joc diferents), i poden tenir una certa similitud amb versions anteriors dels models científics (especialment els de l'antiguitat). Els MM acostumen a ser molt persistents i difícils de superar, i normalment no n'hi ha prou amb «explicar» les idees de cada MCE a l'alumnat, sinó que cal una àmplia varietat d'estratègies per posar a prova els MM de cada estudiant i ajudar-los a construir un MM alternatiu més coherent amb els MCE. A més, accedir als MM de l'alumnat no és una tasca fàcil, ja que només podem saber què pensa realment cada estudiant si li plantejem preguntes o reptes que requereixin comprensió conceptual en context (situacions reals o versemblants) i on hagi de predir o explicar utilitzant diferents llenguatges (oral, escrit, matemàtic, gràfic, icònic, etc.).

El repte a l'aula serà, doncs, generar petites comunitats científiques en què es construeixin i consensuïn MCE, partint dels mateixos MM de l'alumnat i promovent que aquest els expressi, els posi a prova, els consensuï i, quan calgui, validi. Aquest complex procés d'expressió, avaluació i revisió de models és el que anomenem *modelització*. Hi ha moltes estratègies de modelització que farem servir al llarg dels capítols del llibre, com ara l'ús de prediccions davant de fenòmens, l'ús d'experiments mentals hipotètics (què passaria si...), l'ús d'analogies, les experiències de corporeïtzació, les animacions i simulacions virtuals, i moltes altres eines, de les quals parlarem al llarg del llibre.

1.3.2. Els models científics escolars de la física

Tot i que no hi ha una única taxonomia universal per organitzar els continguts de la física a nivell escolar, el criteri que normalment es fa servir per organitzar els continguts curriculars de física s'inspira en les diferents branques de la física clàssica: la mecànica, l'electromagnetisme, la física ondulatoria i la termodinàmica.

Al nostre entendre, cadascuna d'aquestes quatre branques no es pot definir com un únic MCE, sinó que preferim parlar de «famílies de models», en què cadascuna d'aquestes famílies conté diferents MCE amb regles de joc comunes o maneres de mirar el món físic que s'engloben dins d'un mateix paraigua. Per exemple, la física ondulatoria es pot considerar una gran família de models que inclou tant els models de l'òptica com els de l'acústica, que conviuen sota el paraigua de la idea de «propagació d'una pertorbació», però que disposen de regles de joc particulars per explicar la propagació del so i de la llum. A més, la delimitació exacta de cada model també és complicada de fer, ja que els MCE més grans es ramifiquen en submodels més petits que s'entrellacen. Per exemple, podem pensar que el famós MRU és un «petit» MCE que permet

predir la posició d'un cos que es mou a velocitat constant, però disposa d'unes regles de joc (com ara la relació entre magnituds cinemàtiques o la relació del moviment amb el sistema de referència) que són comunes a qualsevol altre model de moviment, com el MRUA, el MHS o el MCU, per la qual cosa el conjunt de relacions cinemàtiques constituïrien un «model de moviment» que englobaria tots els submodels més petits.

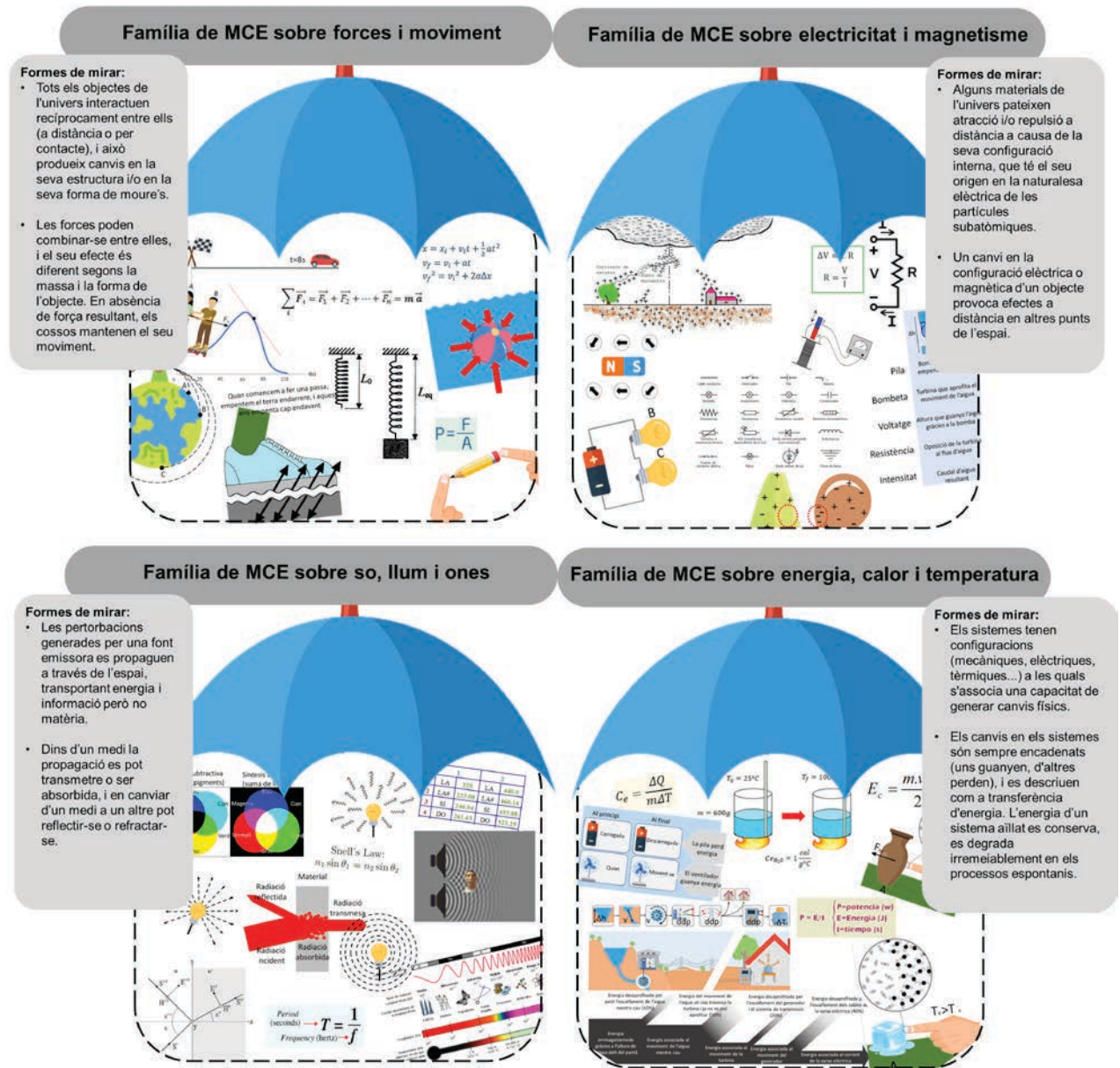


Figura 1.2. Representació de les quatre grans famílies de models científics escolars de la física, representats a través de paraigües dins dels quals hi ha el conjunt d'idees, relacions, representacions i altres entitats de naturalesa abstracta que configuren els models. Els límits d'aquests models són difusos, ja que alguns aspectes se solapen amb altres models de la física o d'altres disciplines científiques.

Aquesta taxonomia que proposem per organitzar els models científics escolars de la física implica algunes limitacions, i és que alguns models sovint se solapen entre ells, ja que comparteixen algunes regles de joc. Per exemple, el model d'interacció de llum i matèria (que explica l'absorció i reflexió de llum) sovint és indeslligable del model de transferència d'energia, ja que pensar en absorció de la llum obliga a pensar en com ha canviat l'estat del material que ha absorbit la llum (s'ha escalfat?, s'ha deformat?).

Una segona limitació es relaciona amb el fet que alguns MCE que podem considerar de física són limítrofs amb models d'altres disciplines, com la geologia, l'electrònica, la biologia, la química, etc. Per exemple, el MCE que explica els estats d'agregació de la matèria (sòlid, líquid i gas) es troba a mig camí entre la física i la química, i el MCE que explica les estacions de l'any i el dia i la nit es troba a mig camí entre la física i la geologia. Això fa que el límit d'on «comença i acaba» la física escolar sigui força difús, i que la decisió de què incloure en els currículums i els materials educatius de física depengui de la tradició local, de criteris editorials o de l'estil docent.

Finalment, també cal aclarir que en la selecció que proposem de MCE de la física hem deixat de banda totes les versions escolars del que podríem anomenar «física moderna i contemporània», com ara la física nuclear, la relativitat especial, la mecànica quàntica, el model estàndard de partícules, etc. El motiu de no incloure cap referència en el llibre a l'aprenentatge d'aquestes branques de la física és doble. D'una banda, es tracta de branques de la física que no apareixen en la majoria de currículums durant la etapa 12-16, ni tampoc en la majoria de materials educatius que publiquen tant institucions públiques com privades. És cert que podem trobar aquest tipus de continguts en cursos que en diferents contextos s'anomenen de «cultura científica», «ciència contemporània», etc., però sempre amb un abordatge qualitatiu, i més orientat a saber de l'existència d'aquestes teories que no pas a comprendre-les. De l'altra, l'ensenyament i aprenentatge de la física moderna i contemporània han ocupat l'atenció del camp de la didàctica de la física en molt menor mesura que la versió escolar de la física clàssica. Això és degut al fet que la física clàssica explica fenòmens molt més quotidians (les coses que cauen, l'aliment que es refreda, la bombeta que brilla, etc.), i per tant, és molt més comú que l'alumnat pugui haver construït explicacions alternatives a les científiques davant de fenòmens que són *per se* pràcticament incomprensibles, com ara la deformació del temps, l'equivalència massa – energia o els forats negres. En resum, considerem que l'ensenyament de la física moderna a secundària obligatòria es vincula més a l'àmbit de la divulgació científica que no pas a la didàctica tal com la concebem en aquest llibre.

Capítol 2. Ensenyar forces i moviment a secundària

Dins de la família de models escolars per explicar les forces i el moviment, tal com hem introduït al capítol 1, per a l'etapa de secundària ens interessa desenvolupar tant un model interpretatiu de les interaccions dels objectes (model de força) com un model descriptiu dels seus efectes sobre l'estat de moviment (model cinemàtic). El desenvolupament del model de força, que acostumem a conèixer com les *lleis de Newton*, inclou tant la conceptualització del que és una força com la utilització d'aquesta idea per comprendre els canvis en l'estat de moviment dels objectes estudiats. En fer-ho, es treballen diferents submodels referents a les diferents situacions paradigmàtiques que aquest model pot explicar: el submodel estat d'equilibri, el submodel de fregament, etc. Al seu torn, hi ha el model que fem servir per descriure el moviment i el canvi de moviment, que normalment es presenta a través dels submodels cinemàtics més coneguts, com ara el moviment rectilini uniforme (MRU), el moviment rectilini uniformement accelerat (MRUA), etc. Per dominar aquest conjunt de models i poder explicar de manera senzilla però satisfactòria les interaccions dels objectes i els canvis en els moviments que aquestes causen, creiem que cal ajudar l'alumnat a construir aquestes idees clau:

- La idea d'interacció física com a intercanvi de forces
- La idea d'inèrcia com a tendència a mantenir l'estat de moviment
- La idea que el moviment és sempre relatiu a una referència externa
- La idea de velocitat com a canvi de posició, i d'acceleració com a canvi de velocitat

Aquestes idees clau, com veurem, posen de manifest que una proposta didàctica adient per treballar la mecànica newtoniana no segueix l'ordre canònic en què s'acostumen a ensenyar les lleis de Newton. Així, la primera idea que proposem treballar a l'aula és la tercera llei, per tal com ens parla de com hem de conceptualitzar les interaccions dels cossos utilitzant la idea de forces. En aquesta proposta, segueix la primera llei de Newton, que introdueix el paper de la massa (inercial) com a resistència a l'efecte que causen aquestes forces en cada cos. Per acabar, proposem introduir la segona llei, introduint la relació qualitativa i quantitativa entre les forces resultants sobre cada cos i els canvis de moviment que aquests experimenten.

Finalment, tot i que el model de forces i moviment també inclou els submodels que fem servir per explicar fenòmens relacionats amb la gravetat o el comportament dels fluids, no els hem inclòs en aquest capítol. El motiu n'és que, a causa de la seva rellevància històrica, cultural i fenomenològica, així com la importància curricular que rep, hi hem destinat un capítol a part. Així, les idees sobre gravitació, pressions i flotació s'abordaran en el capítol 3, mentre que en aquest capítol 2 ens centrem a desenvolupar les idees fonamentals sobre força i moviment, analitzant quines concepcions i idees alternatives acostuma a tenir-ne l'alumnat i de quina manera podem desenvolupar-les a l'escola a través d'activitats didàctiques. També hi inclourem alguns exemples pràctics assenyalats en la literatura.

2.1 La idea d'interacció física com a intercanvi de forces

Abans de començar... Posa a prova les teves idees

Imagina que mires d'empènyer un carro d'anar a comprar. Al principi proves d'empènyer-lo amb poca força, i no aconseguies moure'l. Consideraries que el carro t'ha fet una força a tu? En cas afirmatiu, qui diries que ha fet més força: tu al carro o el carro a tu?



Ara suposa que tornes a intentar-ho, aquesta vegada amb més cura, i finalment aconseguixes moure el carro. Mentre això passa, diries que la força que el carro t'està fent a tu és més gran, menor o igual a la que tu li fas al carro?

Llegiu-ho després d'haver respost individualment

Si alguna vegada has fet aquesta pregunta a l'alumnat de secundària, sabràs quin tipus de respostes acostumen a donar-se. Alguns estudiants diran directament que «el carro no fa força». D'altres respondran que mentre el carro està aturat, ambdues forces (la que tu li fas al carro i la que el carro et fa a tu) són iguals i en sentit contrari, i que en el moment en què tu aconseguixes moure el carro, «li fas una força més gran que la que el carro et fa a tu».

Ens trobem, doncs, davant d'una confusió molt comuna entre la segona i la tercera lleis de Newton. En realitat, ambdues forces, la que li fas (al carro) i la que reps (del carro), sempre són iguals, independentment dels canvis en el moviment que es produeixin en qualsevol dels dos cossos. I són iguals per una qüestió molt simple: són el resultat d'una única interacció carro-persona (tercera llei de Newton). Al seu torn, el fet que el carro aconseguixi moure's és degut al fet que la força que tu fas al carro és més gran que la que el terra fa al carro en fregar-hi i, per tant, que hi hagi una força resultant diferent a zero que produeixi un canvi en l'estat de moviment del carro (segona llei de Newton).

2.1.1. El punt de partida de l'alumnat sobre la tercera llei de Newton

La investigació didàctica ha dedicat molts esforços a analitzar per què costa tant comprendre en profunditat i claredat les lleis de Newton. A continuació, resumim algunes de les idees alternatives més comunes en l'alumnat de secundària sobre la relació entre força i interacció que són contradictòries amb la tercera llei de Newton, i que haurem de tenir en compte per a la seva revisió al llarg de l'ensenyament de física. Les idees aristotèliques de força (és a dir, aquelles que pertocuen a la primera i segona lleis de Newton), les deixarem per més endavant, a l'apartat 2.2.1.

a. Força com l'acció d'un agent «actiu»

Una de les dificultats més comunes per arribar a comprendre les lleis de Newton és que molts estudiants, quan comencen l'educació secundària, ja han construït una idea intuïtiva de força com una acció (empenta o

estirada) que se cenyeix a les persones o a altres entitats «actives», és a dir, entitats que es mouen o es manifesten d'alguna manera, com els animals, els robots i les màquines, el vent o el corrent d'aigua. En aquest sentit, en diferents recerques clàssiques es va observar com els estudiants tenien dificultats per associar al terra, a les parets o a l'aire la capacitat d'exercir força.

Aquesta confusió té diferents causants. D'una banda, la percepció que tenim tots quan empenyem objectes que estem realitzant una acció que té un efecte sobre els altres, que porta molts estudiants a induir que per exercir força cal ser un agent actiu. Però, a més, la representació prototípica que es fa de les forces (per exemple, quan s'il·lustra la segona llei de Newton en molts materials educatius) tampoc hi ajuda gaire, ja que de nou es relaciona la força com una cosa que realitza un agent actiu (normalment una persona) quan empeny o estira alguna cosa.

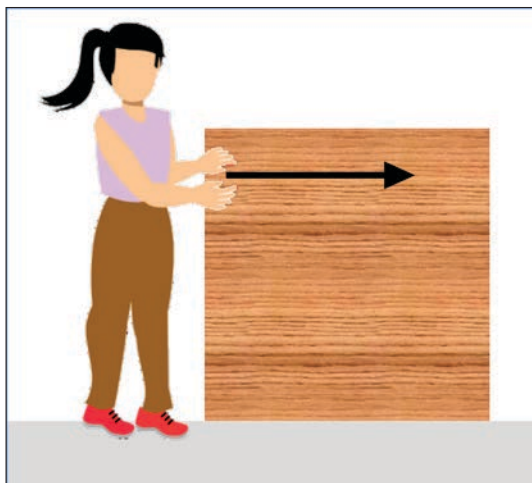


Figura 2.1. Representació prototípica on es representa la idea de força com una acció unidireccional, i no com una interacció d'objectes. Font: elaboració pròpia.

També és comú trobar idees de l'alumnat en què la força és una acció que s'exerceix amb una espècie de jerarquia, per exemple d'un cos fort sobre un de feble, d'un cos gran sobre un altre de petit, d'un cos que és en moviment sobre el que roman en repòs o d'un cos rígid, dur o tenaç sobre un d'elàstic, tou o fràgil. Així, si imaginem la típica situació en què una persona colpeja una pilota (ja sigui amb la mà, amb un bat o amb una raqueta), el més comú serà que l'alumnat parli d'una força que la persona fa sobre la pilota, però costarà més que pensin en la força que la pilota fa sobre la persona. No obstant això, si la pilota surt disparada i colpeja contra alguna altra persona, llavors sí que acostuma a aparèixer la idea que la pilota és qui fa la força, però no abans.

b. Força de reacció com a conseqüència de l'acció, que apareix després i en resposta a l'acció

En paral·lel, hi haurà vegades que l'alumnat sí que incorpori la idea de «reacció», però utilitzant-lo com a sinònim de «conseqüència» o «resposta» d'una acció suposadament prèvia. Aquesta idea està induïda per una interpretació errònia de la tercera llei de Newton, que sovint es presenta de manera simplista com a llei «d'acció-reacció». Tornem a l'exemple de la pilota del cas anterior. Suposem que arribem a la conclusió amb el nostre alumnat que, en rebre un cop de peu, la pilota fa la mateixa força sobre el peu de la persona que el peu de la persona sobre la pilota, ja que sentim aquesta força (ens pot arribar a lesionar) i així ho defineix la tercera llei de Newton. Fins i tot en aquest cas, si preguntem a l'alumnat quina força es produeix abans, molts estudiants consideraran que ambdues forces són seqüencials: primer la persona xuta la pilota, fent-li una força, i després, com a reacció a aquesta força que rep la pilota, aquesta li retorna una força al peu que apareix ni que sigui només unes poques mil·lèsimes de segon més tard. És a dir, l'alumnat entén la tercera llei de Newton de manera anàloga a com, en biologia, es parla d'estímul-resposta.

El racó de pensar

L'adverbi «llavors» no ajuda a fer bones explicacions en física

Laurence Viennot (1996) va trobar que molts estudiants feien servir l'adverbi «llavors» per relacionar les forces d'acció i de reacció: «el cotxe fa una força sobre el remolc, i llavors el remolc fa una força de reacció sobre el cotxe», i que ho feien estudiants parlants del francès (adverbi *alors*) o de l'espanyol (adverbi *entonces*). Segons l'autora, aquest adverbi usat per explicar l'acció-reacció, que es troba a mig camí entre la relació causal i la cronològica, mostra la tendència als raonaments de tipus causal lineal, un mecanisme de raonament espontani que desenvolupem les persones de manera intuïtiva, i que, tot i ser molt útil en moltes situacions quotidianes, no ho és tant per construir explicacions científiques. De fet, això no passa només amb la tercera llei de Newton, sinó també amb moltes altres explicacions científiques en termodinàmica o en l'electromagnetisme, com veurem en els pròxims capítols.

c. Força normal com la força de reacció a la força pes

Seguint amb les dificultats per entendre la tercera llei de Newton amb la qual obrim el capítol, hi ha una gran dificultat en l'alumnat per distingir entre les forces d'acció-reacció i les situacions en què un cos rep dues forces en sentit contrari que es contraresten. Aquest és el cas de la relació pes (P) i normal (N) en un objecte en repòs sobre una superfície plana (per exemple, sobre el terra o sobre una taula). Hi ha una tendència natural a pensar que el fet que ambdues forces siguin del mateix valor, s'apliquin sobre el mateix cos i vagin en sentit contrari és degut a la tercera llei de Newton. Això fa que no sigui necessari estudiar la naturalesa d'aquestes forces (per què la normal sovint coincideix amb el pes?, amb quina interacció del cos es relaciona aquesta força?). En fer-ho, deixem de concebre el fenomen com a problemàtic i interessant, i no ens fem preguntes clau, com ara com pot ser que la meua mà s'enfonsi en l'aigua o a la sorra però no a la taula?

Les forces P i N no sempre són iguals i de sentit contrari, sinó que poden tenir valors diferents (per exemple, quan un objecte només es repenja parcialment sobre una superfície) i també direccions diferents (per exemple, quan la superfície està inclinada respecte de l'eix horitzontal). Podem sospitar, a més, que no són forces d'acció-reacció, perquè, per definició, les forces que descriuen la mateixa interacció no es cancel·len entre elles, ja que actuen sobre cossos diferents (tret que considerem els dos cossos dins d'un mateix sistema, però llavors estaríem parlant de forces internes). Les parelles de força acció-reacció de P i N són altres de diferents, que no s'acostumen a tenir en consideració ja que no actuen sobre l'objecte: per al pes, la seva parella és la força d'atracció gravitatòria que l'objecte fa sobre el planeta Terra. Per a la normal, la força emparellada és la força que l'objecte fa contra la superfície en recolzar-se sobre ella i intentar penetrar-la.

2.1.2. Com ajudem a construir una idea de força coherent amb la tercera llei de Newton?

Superar les idees espontànies de força com a acció «agentiva» sobre el feble (així com la idea de força com a propietat, que veurem a l'apartat 2.2.1) no és gens ni mica una tasca fàcil ni immediata. Podem enunciar i il·lustrar les lleis de Newton de les maneres tan dinàmiques i acolorides com vulguem, però si no enfrontem l'alumnat a fenòmens i situacions que ajudin a confrontar la lògica d'una «acció» serà difícil que de manera espontània es pugui construir un model robust. Així, per exemple, si solament mostrem a l'alumnat situacions prototípiques d'una persona empenyent o estirant un objecte, com la de la figura 2.1, podríem estar reforçant aquest tipus de models mentals. Si, per contra, fem servir exemples en què es visualitzi la interacció de dos objectes inerts, com en el cas de la figura 2.2, i preguntem a l'alumnat «qui fa la força i qui la rep?» serà més fàcil que comencin a pensar en la coexistència de forces emparellades per descriure la interacció de dos objectes. El mateix passa respecte de forces per contacte o a distància.

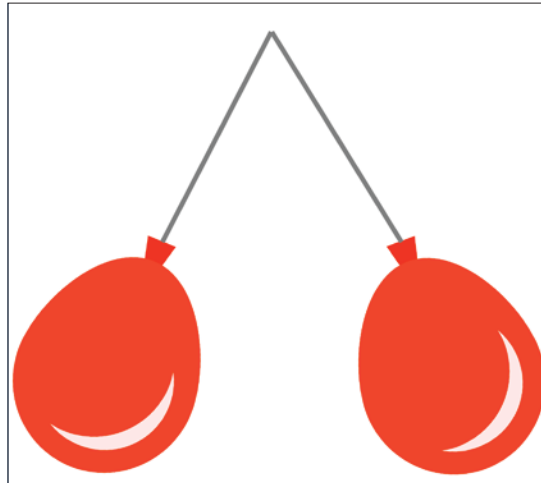


Figura 2.2. Dos globus carregats electrostàticament que es repel·leixen mútuament ajuden a visualitzar que l'acció de repulsió és mútua. Font: elaboració pròpia.

També és interessant experimentar amb la tercera llei de Newton en primera persona, generant situacions equivalents entre «donar» i «rebre» força. Si experimentem usant patins o plataformes lliscants (de manera que el fregament sigui mínim), podem demanar a dos estudiants A i B que s'empenyin mútuament, primer A empenyent B i després al revés, per observar, així, que en tots dos casos els dos experimenten canvis en el seu estat de moviment i noten tant la força que fan com la que reben.

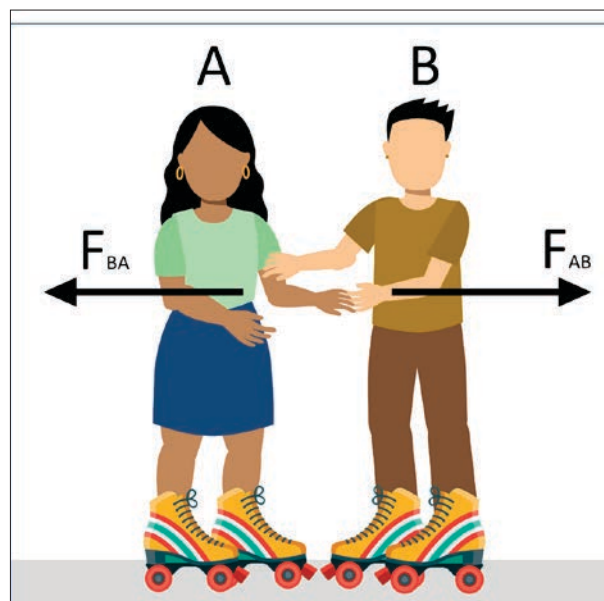


Figura 2.3. Dos estudiants sobre patins o patinets ajuden a percebre que «donar» i «rebre» una empenta són dues accions equivalents. Font: elaboració pròpia.

A més, si es disposa d'eines com ara dinamòmetres analògics ben calibrats o, encara millor, sensors digitals de força, és molt recomanable fer l'exercici d'estirar una corda o empènyer una barra lligades a dos sensors, i observar com no només el valor en cada instant mesurat per ambdós sensors és exactament el mateix, sinó que la gràfica que se n'obté és idèntica per a ambdós sensors (o simètrica, segons el sentit del sistema de referència).

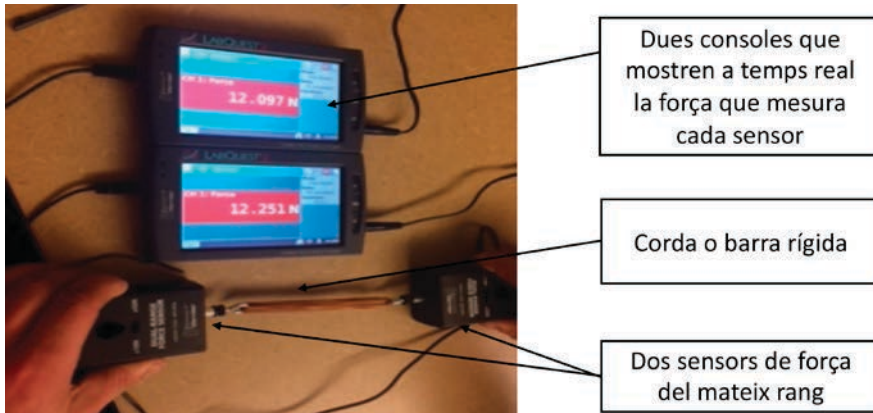


Figura 2.4. En usar dos sensors de força lligats als dos extrems d'una corda o una barra rígida, el valor de la força que mesuren a temps real els dos sensors és el mateix, d'acord amb la tercera llei de Newton. Font: elaboració pròpia.

Arribats a aquest punt, algun alumne podria pensar: «Si donar i rebre és el mateix, i la força és la mateixa, com pot ser que hi hagi persones més fortes que d'altres, i que, en competicions esportives com el rugbi o el sumo, els jugadors competeixen per veure qui fa més força?». Només quan l'alumnat comenci a construir la idea de forces d'acció-reacció com a coexistents i fruit d'una única interacció és convenient introduir la idea de fregament per construir explicacions més complexes que les anteriors: ser més fort no significa empènyer contra l'altre jugador amb més força de la que es rep del jugador (això no pot passar!), però sí tenir una musculatura prou potent (i calçat que fregui molt) per fer més força contra el terra, de manera que aquest et faci més força a tu (tercera llei de Newton) i puguis aprofitar aquesta força per guanyar l'adversari.

A més a més, i particularment si s'ha parlat del concepte d'equilibri de forces, l'alumnat pot pensar que si dues forces són d'acció-reacció o un parell de forces iguals però de sentit contrari, aquestes es contraresten (igual que en el cas de N i P). Per aquest motiu, és crucial treballar amb l'alumnat la idea de punt d'aplicació de cada força, i analitzar sobre quin objecte (i per interacció amb quin altre objecte) s'està produint cada força. Per exemple, la força que la persona B fa sobre la persona A és igual que la que la persona B fa sobre la persona A en la figura següent. Però cada persona només rep els efectes d'una d'aquestes forces. I, per tant, en cada persona es produirà un moviment diferent, que pot ser cap endavant, cap enrere o quedar-se quiet en funció de si aquesta força que rep en interaccionar amb el contrincant és més gran, més petita o igual a la de fregament que també rep en interaccionar en prémer els peus contra el terra.

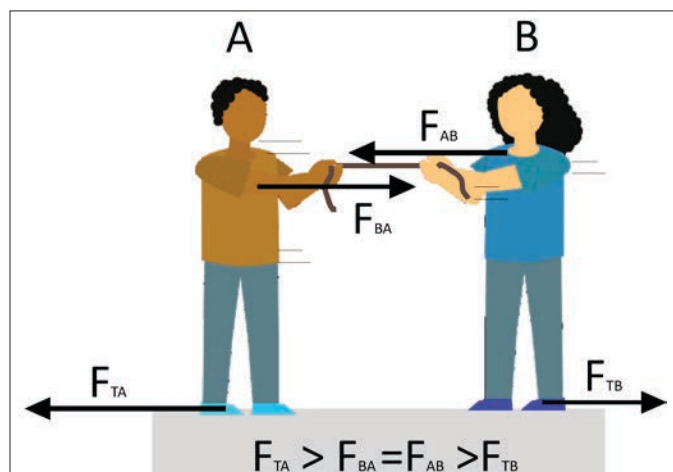


Figura 2.5. Diagrama de forces que actuen en el joc de la corda en el moment en que A guanya a B. Font: elaboració pròpia.

El racó de pensar

Quan caminem, el terra ens empeny cap endavant o cap endarrere?

Quan pensem en la força de fregament sovint reduïm l'ensenyament a calcular-ne el valor en situacions idealitzades mitjançant l'equació $F = \mu \cdot N$. El que resulta interessant, però, és utilitzar la idea de fricció com a submodel per explicar els canvis en el moviment degut a les interaccions amb el que ens envolta, particularment les superfícies sobre les que ens movem. Se sol dir que el fregament és una força que sempre s'oposa al moviment entre dues superfícies en contacte. És cert, però en realitat no és tan intuïtiu: quan caminem, el terra ens empeny cap endavant o cap endarrere?

La resposta és que ens empeny tant endavant com endarrere, però de manera intercalada. Quan estem fent un pas aixecant una cama i encara ens repengem sobre l'altra, el peu en contacte amb el terra (la punta del peu, de fet) fa una força cap enrere, i alhora el terra ens la fa cap endavant, impulsant-nos. Quan la cama més avançada torna a repenjar-se contra el terra per aixecar la posterior, la nostra tendència a seguir movent-nos cap endavant ens fa empènyer el terra cap endavant (amb el taló), i això fa que el terra ens empenyi simultàniament cap enrere. Això és el que ens impedeix continuar movent-nos, tret que comencem de nou el procés. Per això caminem pas a pas i necessitem mobilitat en el peu per caminar.

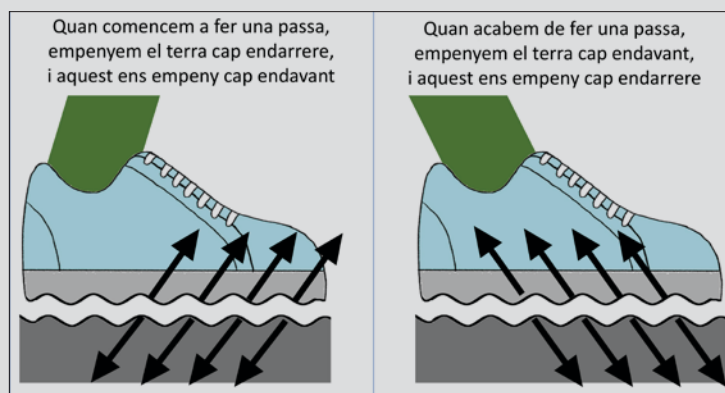


Figura 2.6. Representació de les forces de fregament mentre caminem. Adaptat de Viennot (2003).

2.1.3. A quina versió de la tercera llei de Newton volem arribar i per a què?

A través d'aquest conjunt de situacions problema volem que l'alumnat vagi posant a prova les seves idees inicials i ajudar-lo a revisar el seu model de força. Volem que sigui capaç d'entendre que els objectes interaccionen (s'atrauen o es repel·leixen, s'empenyen o s'estiren), i que aquesta interacció pot ser de contacte, però també a distància. Volem que el nostre alumnat sigui capaç de comprendre que tota interacció de dos objectes correspon a dues forces d'igual valor (igual magnitud i direcció però sentit contrari) aplicades a cada objecte per separat (que tot i aparèixer juntes i a la vegada, s'apliquen i afecten cada cos de manera independent). I que això passa sempre que dos cossos interaccionen, independentment de quines altres forces actuïn sobre cada cos.





Les situacions quotidianes en què un alumne que acaba la secundària ha de ser capaç de fer servir la tercera llei de Newton són moltes. Per exemple, per explicar per què un cotxe encallat al fang, la sorra o l'herba fresca no es pot moure perquè no pot fer (*ergo* rebre) força al terra, per més potent que sigui ni per més «fort» que es premi l'accelerador. O per exemple, per què quan colpegem contra alguna cosa amb les mans o els peus (una pilota, una pedra, etc.) ens podem lesionar, ja que el nostre cos rep la mateixa força que la que realitza.

Prova-ho a l'aula

Què mesura exactament la bàscula del teu bany? (individual o en grup)

Segurament has fet servir moltes vegades una bàscula de bany per pesar-te. Però què significa exactament pesar-te? Què és el que mesura realment una bàscula de bany?

Imagina que disposes d'una bàscula de bany, i també d'una barra (tipus un pal d'escombra), la massa del qual és petita amb relació a un cos humà. Imagina les quatre situacions següents:

			
<p>Sobre la bàscula, empenyent la barra contra el terra, cap avall</p>	<p>Sobre el terra, empenyent la barra contra la bàscula, cap avall</p>	<p>Sobre la bàscula, empenyent la barra també contra la bàscula, cap avall</p>	<p>Sobre la bàscula, empenyent la barra contra el sostre, cap amunt</p>

En els quatre casos descrits:

1. Fes la teva predicció: com ordenaries el valor que marcarà la bàscula per a cadascuna de les quatre situacions?
2. Realitza les quatre mesures i anota el valor que obtens per a cadascuna. En què s'assembla i quines diferències hi ha entre la teva predicció i el resultat que has obtingut?
3. Explica quines forces actuen sobre la balança i quina relació tenen aquestes forces amb el valor que has obtingut en cada cas.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

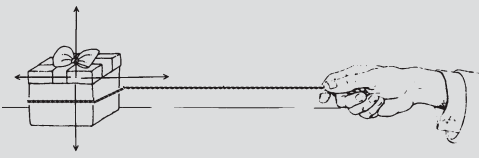
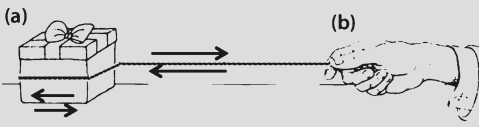
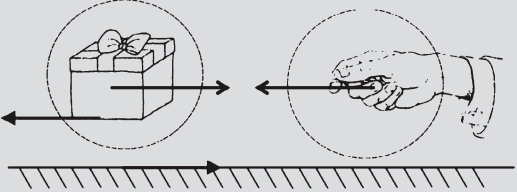
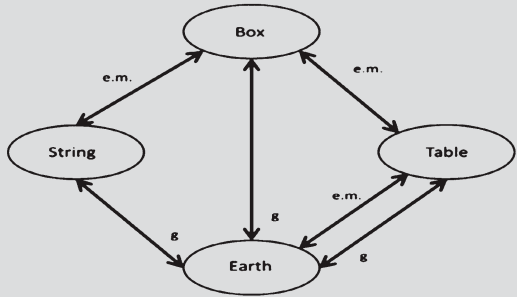
Aquesta activitat, inspirada en Giordan (1993), obliga l'alumnat a raonar que el que mesura la bàscula no és el nostre pes (el que ens atreu la Terra), sinó la força que ella rep (el que repengem sobre ella), que és la mateixa força que ha de fer per suportar l'objecte que es troba a sobre seu. Plantejant situacions en què aquesta força sigui diferent del pes, promovem que l'alumnat entengui que la normal no és la força de reacció al pes, sinó la reacció al que ens recolzem en qualsevol superfície. A més, la tasca obliga a fer sumes i restes de força, tenint en compte que només se sumen i es resten forces que actuen sobre un mateix cos. I també practiquem dibuixar parells de forces corresponents a cada interacció. És a dir, entre barra i persona, la força que la barra fa sobre la persona és igual però de sentit contrari a la que la persona fa sobre la barra; la de la persona sobre el sostre és igual que la del sostre sobre la persona, etc.

A més, per a aquella part de l'alumnat que sí que vulgui prosseguir la formació en física en els estudis postobligatoris, una comprensió en profunditat de la tercera llei de Newton li permetrà comprendre que el model de forces és una de les formes possibles d'entendre les interaccions dels cossos (alternativa a la idea de camp, per exemple). També enfrontar-se a altres versions més sofisticades del model de forces, en què apareix la idea de quantitat de moviment en un sistema mecànic (i per tant el concepte de forces internes i externes del sistema), que serà clau per resoldre problemes relacionats amb xocs i explosions. Comprendre la naturalesa de la força normal, la força de fregament o el pes serà de gran utilitat per construir la idea de treball mecànic associat a cada força en diferents situacions problema.

El racó de pensar

Diferents maneres de representar (i de pensar en) forces

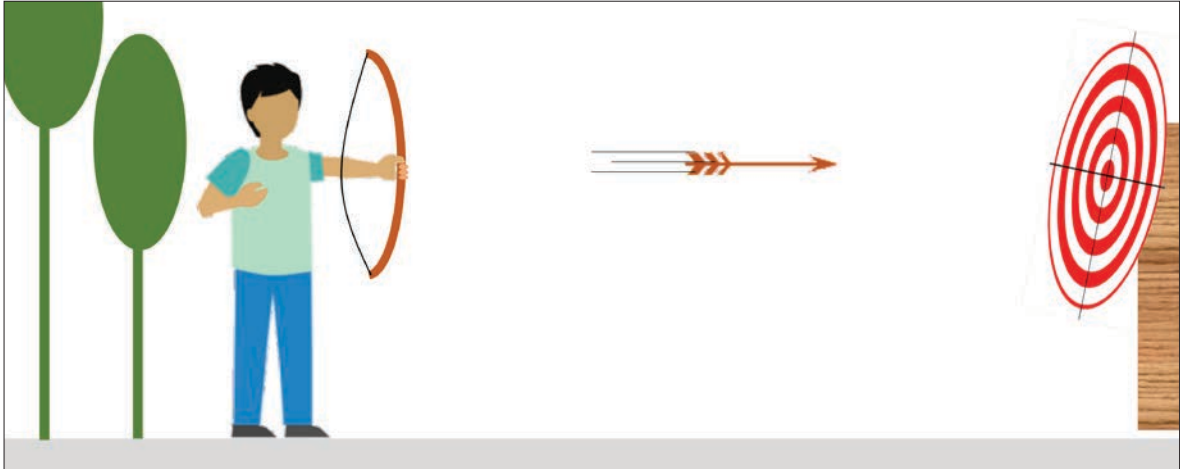
Tot i que sovint, per representar les forces, aquestes es dibuixen com a vectors aplicats sobre el centre de masses d'un objecte (el que es denomina diagrama del cos lliure o *Free Body Diagram*), realment han estat moltes les maneres de representar les forces a la literatura en didàctica de la física. La taula següent, elaborada per Garcia-Lladó i López-Simó (2020), mostra algunes de conegudes en la literatura, tot assenyalant els avantatges o inconvenients de cada tria didàctica.

	<p>Representació 1. Ajuda a sumar i restar forces que actuen sobre la caixa (per aplicar-hi la segona llei de Newton), però no ajuda a pensar en la coexistència de forces (tercera llei de Newton)</p>
	<p>Representació 2. Ajuda a representar la coexistència de dues forces (tercera llei), però alhora és més difícil pensar en quina força resultant actua sobre la caixa (segona llei). (Font: Gagliardi <i>et al.</i>, 1989)</p>
	<p>Representació 3. Permet identificar quines forces actuen sobre la caixa (segona llei) i alhora quines són les forces existents fora del cercle que envolta la caixa (tercera llei). (Font: Viennot, 1996)</p>
	<p>Representació 4. L'èmfasi no està en el caràcter vectorial de la força, sinó en la relació conceptual de reciprocitat en les interaccions (tercera llei), tot i que això dificulta pensar quina força resultant rep la caixa i en quins eixos (segona llei), ja que la normal i el fregament es conceben com una única interacció i les direccions de les fletxes no representen direccions de les forces. (Font: Jimenez y Perales, 2001)</p>

2.2. La idea d'inèrcia com a tendència a mantenir l'estat de moviment

Abans de començar... Posa a prova les teves idees

Suposa que una persona llança una fletxa amb un arc.



Quina força o quines forces actuen sobre la fletxa en l'interval de temps en què la fletxa es desplaça solcant l'aire?

- a) Actua o no actua una força cap endavant?
- b) Actua o no actua una força cap endarrere?
- c) Actua o no actua una força cap amunt?
- d) Actua o no actua una força cap avall?

Llegiu-ho després d'haver respost individualment

La resposta més comuna que sol donar l'alumnat de secundària quan encara és inexpert en física és «la força cap endavant», o bé «la força que té», «la força que l'empeny», «la força que li ha donat l'arc»... El model intuïtiu que sustenta aquesta resposta és que en empènyer la fletxa li hem donat una força, que en certa manera s'ha quedat en la fletxa, i això li permet continuar avançant. El problema és que, mentre es mou, la fletxa no rep una força cap endavant, sinó més aviat cap endarrere (el fregament amb l'aire), que, juntament amb el pes, són les responsables de canviar el moviment de la fletxa.

2.2.1. El punt de partida de l'alumnat sobre la primera i segona lleis de Newton

Igual com passa amb les idees de força com a acció, també és comú identificar en l'alumnat de secundària algunes idees alternatives respecte de la primera i segona lleis de Newton, que resumim a continuació.

a. Força com a propietat dels objectes

Ja a l'apartat anterior hem intentat justificar per què és important ajudar l'alumnat a comprendre que la força és una interacció. I és que la idea de força com a propietat dels objectes és una cosa molt arrelada en les formes espontànies de raonar. Molts estudiants conceben les forces com una propietat que tenen els cossos, igual que posseeixen altres propietats físiques (rigidesa, duresa, densitat, etc.). Aquesta concepció és persistent i, per tant, és evident que només verbalitzant o mostrant escrita la primera llei de Newton o resolent problemes aplicant-hi la segona no n'hi haurà prou per fer canviar les formes de pensar dels estudiants. Però per què diem que és una idea tan persistent?

En primer lloc, perquè es tracta d'un exemple de pensament aristotèlic, és a dir, una manera de raonar que ha perviscut entre la humanitat durant segles, molt més simple i intuïtiva que el pensament newtonià. A més, sabem que en el llenguatge quotidià diem que les forces «es tenen», quan en realitat hauríem de dir que les forces «es fan o es reben». Des de petites, les criatures senten com els seus familiars els diuen «quanta força que tens!» o «que n'ets, de fort!».

A més, quan pensem en força solem pensar en objectes que disposen d'un sistema de propulsió que els permet avançar (el motor del cotxe, les turbines de l'avió, els pedals de la bicicleta, els engranatges de les joguines de corda, etc.), sense els quals aquests objectes s'aturarien a causa del fregament amb el terra, amb l'aire o entre els seus propis mecanismes interns. És normal, doncs, que de manera intuïtiva pensem que els objectes es mouen només si alguna cosa els empeny a fer-ho.

Finalment, aquest model mental d'una força que empeny els objectes i en provoca el moviment, tot i ser totalment contradictori amb les lleis de Newton, en el fons té força coherència interna, ja que permet explicar de manera alternativa molts processos mecànics: quan un objecte es frena es pot entendre que la seva força simplement «es gasta», i quan un objecte empeny o xoca amb un altre (és a dir, li fa força) es pot entendre com que la força que té un cos «passa» a l'altre. Cal reconèixer que, malgrat tot, aquestes formes aristotèliques de raonar són força més intuïtives que les que volem que aprenguin, i és per això que cal parlar-ne molt i raonar junts per superar-les.

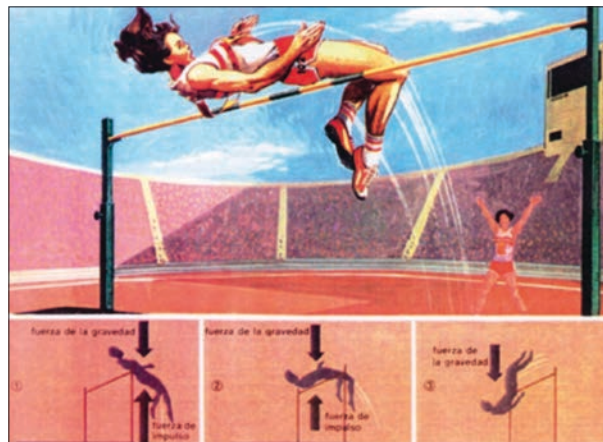


Figura 2.7. Representació errònia de la força usada en un llibre de text escolar, que indueix a pensar que hi ha una força vertical que es té i es va gastant, que denomina «força d'impuls». Obtingut de Carrascosa (2017).

b. Força proporcional a la velocitat

A més, aquest model mental intuïtiu sobre força com a propietat sovint coexisteix amb la confusió entre força i velocitat, o simplement amb la idea que la força que «posseeix» un objecte és proporcional a la seva velocitat. En realitat, el problema és la confusió amb altres magnituds físiques que sí que són proporcionals a la velocitat, com el moment lineal o l'energia cinètica, o proporcionals a la força, com l'acceleració. Aquesta confusió acostuma a sorgir durant l'educació primària, etapa del desenvolupament dels estudiants en què ja observen fenòmens sobre moviment, però sense la maduresa cognitiva per distingir cada concepte.

Com hem dit, en aquest model mental, no es raona en termes de «qui fa o rep la força», sinó de qui la posseeix. Fins i tot és comú que l'alumnat combini en les seves explicacions forces que rep un cos amb altres que simplement posseeix pel fet d'estar en moviment. Un mètode molt clarificador per fer aflorar aquest model mental és el de la figura 2.8, en què es pregunta als estudiants quines forces actuen sobre una pilota quan puja, quan s'atura a l'aire momentàniament i quan baixa. Tot i que, si no tenim en compte el fregament, en tot moment l'única força que actua és el pes (perquè en el seu recorregut la pilota no interacciona amb res més que amb la Terra, que l'atreu), la literatura ens indica que el gruix de l'alumnat afirma que existeixen forces en el sentit del moviment que expliquen aquest moviment.

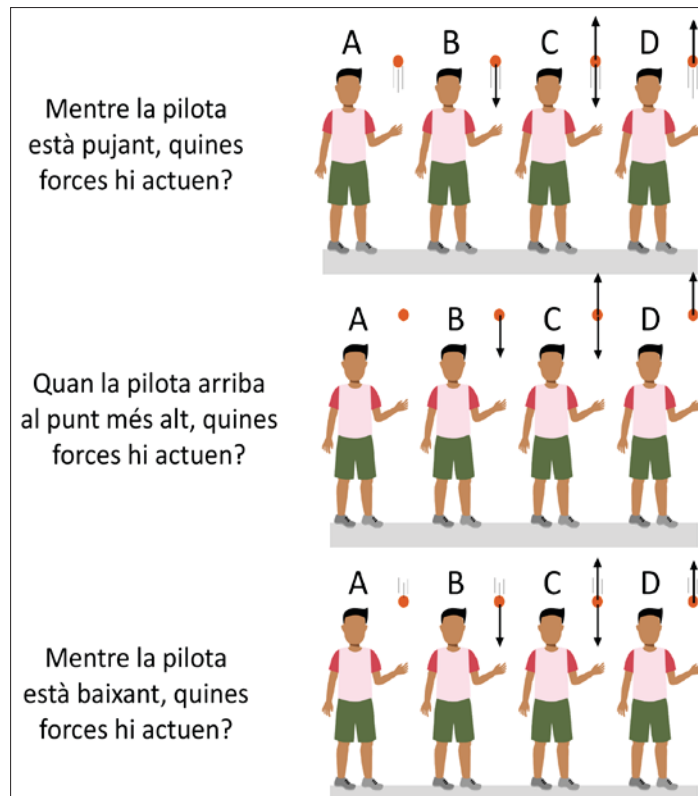


Figura 2.8. Qüestionari usat en múltiples recerques sobre idees de l'alumnat respecte del concepte de força.
Font: elaboració pròpia.

c. Forces fictícies

Les forces fictícies, concepte usat en mecànica avançada per explicar els canvis en el moviment en sistemes no inercials (o accelerat), solen jugar-nos també males passades per explicar correctament fenòmens simples. Pensem, per exemple, quan estem asseguts en un vehicle i aquest experimenta canvis en el seu moviment. Si el vehicle accelera, percebem com si el nostre cos rebés una empenta cap endarrere, mentre que quan frena percebem aquesta empenta cap endavant. Si el vehicle gira, la nostra sensació serà que estem sent empesos cap a l'exterior de la corba, fet que popularment es denomina com a «força centrífuga». En tots els casos, el que experimenta el nostre cos és simplement la tendència natural a mantenir l'estat del moviment (el que denominem com a primera llei de Newton), és a dir, el fet que ens resistim a canviar el nostre estat de moviment. Aquesta tendència, percebuda des d'un sistema de referència accelerat (el vehicle que accelera, frena o gira), té els mateixos efectes que tindria una força sobre un sistema en repòs o en moviment rectilini i uniforme, que és on nosaltres som des del nostre punt de vista.

2.2.2. Com ajudem a construir una idea de força coherent amb la primera i la segona lleis de Newton?

En primer lloc, cal tenir en compte que desmuntar les idees aristotèliques tan arrelades en els raonaments físics espontanis no és una tasca fàcil. Igual que hem dit en l'apartat anterior, no n'hi ha prou amb enunciar el que volem que el nostre alumnat compregui, sinó que es requereix una combinació d'experiències observables, raonaments degudament orientats i bastides que ajudin a la construcció del concepte de força.

En alguns casos, es pot enfrontar l'alumnat a petites proves experimentals de predicció – observació – explicació, com la que es proposa a la figura 2.9, tot preguntant-li a on seguirà movent-se la bala un cop surti del plat? Aquells estudiants que pensin en la força com una propietat que es posseeix tendiran a respondre

que la trajectòria és la *c*, mentre que aquells que tinguin la idea alternativa de força centrífuga prediran la trajectòria *a*. Comprovar les hipòtesis amb els resultats experimentals pot ser de gran utilitat per ajudar a desmuntar aquestes idees alternatives.

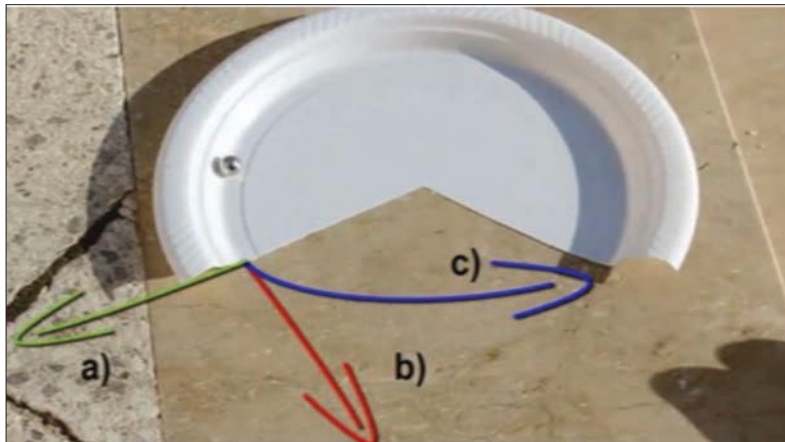


Figura 2.9. Petit experiment per explicar les idees prèvies de l'alumnat sobre força. Font: Torres (2016).

També és molt recomanable establir diàlegs amb l'alumnat que ajudin a posar a prova els models mentals. Per exemple, en una activitat sobre cotxes de joguina per investigar sobre accidents de trànsit, en preguntar a un estudiant «Quines forces actuen sobre el vehicle mentre està frenant?», aquest respon «La força del fre cap endarrere i la força que té cap endavant». La nostra temptació com a docents seria dir: «La teva resposta està malament: No existeix tal força cap endavant, només hi ha fregament». No obstant això, si realment volem que l'alumne revisi el seu model mental, abans haurém de fer que el posi a prova. Així doncs, la nostra repregunta podria ser: «I quina de les dues forces que dius creus que és més gran?». Si continua pensant que la «força cap endavant» és més gran, podem tornar-hi amb un «estàs segur que amb una força cap endavant més gran que la de frenada acabarà frenant?». I si respon que la «força cap endavant» és menor, ja haurém començat a posar en crisi el seu model mental: ja està pensant que el cos avança tot i tenir una força resultant cap endarrere.

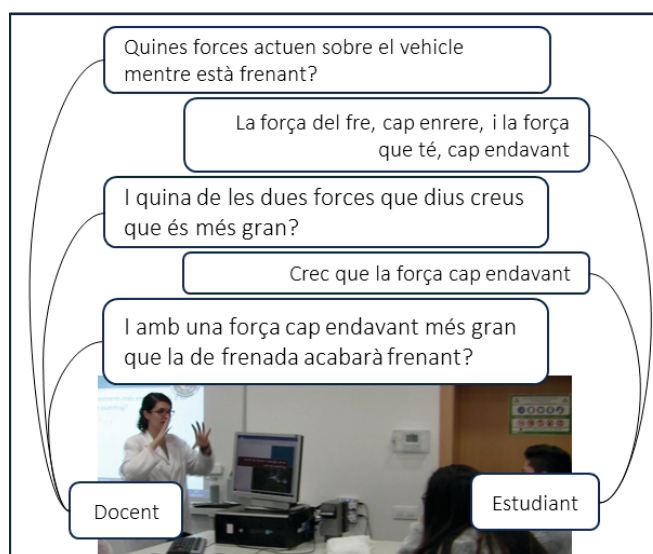


Figura 2.10. Conversa a l'aula sobre les forces que actuen en la frenada d'un vehicle. Font: Vergara, López-Simó i Couso (2021).

I com sempre, ens cal treballar amb l'alumnat en situacions contraintuïtives, que posin a prova el que estan aprenent. Per exemple, en analitzar el xoc entre una moto i un camió, un alumne que ha entès la tercera llei ens dirà que el camió li fa la mateixa força a la moto que la moto al camió. Necessitem, però, la comprensió de la primera i segona lleis per comprendre que l'efecte d'aquestes forces iguals no és el mateix en cada un dels cossos a causa de les seves masses (inèrcia) i el moviment que portin. Així, la mateixa força que pot arribar a accelerar en sentit contrari i fer sortir volant el motorista uns quants metres només deforma una mica (canvia el moviment) el parafang del camió.

2.2.3. *A quina versió de la primera i segona lleis de Newton volem arribar i per a què?*

Posar a prova i revisar les idees intuïtives de l'alumnat hauria de portar a construir una idea d'inèrcia útil per al model de força, relacionant la primera i la segona lleis de Newton. Això implica entendre que els cossos no necessiten una força resultant per mantenir el moviment (a velocitat constant), però sí per canviar el moviment (per girar o per augmentar o disminuir la velocitat). Evidentment, tot moviment és el resultat d'una força anterior (la que l'ha posat en moviment), però un cos a una certa velocitat que ja s'està movent així no necessita estar rebent força per continuar. Això es pot veure en moviments que es donen quan no hi ha cap fregament o molt poc, com el lliscament d'un objecte sobre el gel. En canvi, quan un objecte es desplaça sobre una superfície o un mitjà que ofereix resistència, sí que requerirà una força per continuar movent-se a velocitat constant, en aquest cas igual a la de fregament que s'oposa al seu moviment. En el cas que sí que actuï una força resultant sobre un objecte, aquest experimentarà un canvi de moviment major o menor segons la magnitud d'aquesta força (més força, més canvi de moviment), però també segons la seva massa (més massa, menys canvi de moviment). Això és així perquè la massa ens dona una idea de la resistència de l'objecte a canviar l'estat de moviment.

Aquest conjunt de raonaments hauria de servir per explicar moltes situacions quotidianes, relacionades amb el treball físic, amb l'esport, amb els transports, etc. Per exemple, hauria de servir perquè l'estudiant pugui prendre decisions per minimitzar el seu esforç a l'hora de desplaçar objectes pesants (per exemple, fer servir rodes en allò que es vol desplaçar per disminuir la fricció, però als peus sabates que no rellisquin). També per comprendre els principis físics en un parc d'atraccions, o per argumentar a favor de mesures de seguretat viària, entre molts d'altres.

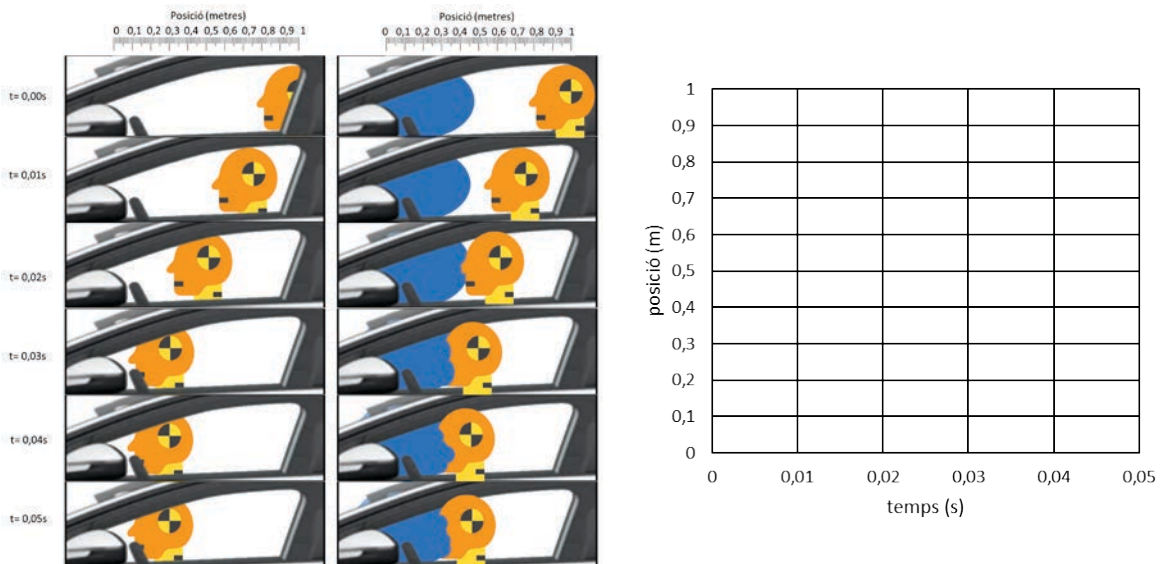
A més, per a aquells estudiants que prossegueixen els estudis de física, el model escolar de forces a secundària serà la base per construir idees més complexes, com els sistemes de força complexos (plans inclinats, situacions amb politges, peralts, etc.), i també la dependència del valor de la massa en moviments complexos, com per exemple per què en un moviment harmònic simple o MHS existeix la relació $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$.

Prova-ho a l'aula

Com ens protegeix l'airbag en una col·lisió? (individual)

Abans de començar, explica amb les teves pròpies paraules per què creus que un *airbag* o coixí de seguretat pot ser una bona o mala mesura de seguretat viària.

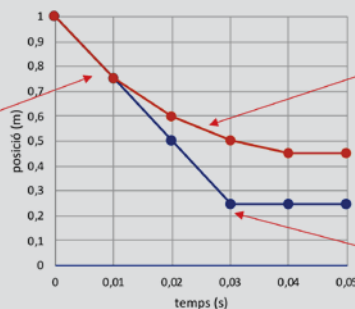
En les proves de seguretat viària es fan servir ninots (*dummies*) per investigar com són les forces que actuarien en un accident real. En la imatge següent es mostren dues seqüències de fotogrames, amb un interval de temps de 0,01 segon entre ells. Els fotogrames de l'esquerra representen el moviment del ninot en el moment que el cotxe, que circulava a 25 m/s, xoca contra una paret, i el conductor continua el seu moviment endavant (primera llei de Newton) fins a estampar-se contra el parabrisa. En els fotogrames de la dreta també es llença un cotxe a 25 m/s contra una paret, però aquest cop s'activa l'*airbag*. A sobre dels fotogrames hi ha una regla per mesurar la posició horitzontal del cap del ninot respecte del cotxe. Usa aquest regle per descriure el moviment del cap en ambdós casos. És igual? Quines diferències observes en el canvi de moviment del cap?



1. Construeix una gràfica de posició temps per representar la posició exacta del cap dels ninots en cada fotograma. Un cop feta, explica amb les teves paraules què significa el pendent de la gràfica.
2. En quin dels dos casos es produeix un canvi de moviment més brusca? Quina relació té això amb les forces que actuen sobre el cap?
3. A quina conclusió pots arribar? Com ajuda l'*airbag* a prevenir lesions en una col·lisió?

Aquesta activitat permet a l'alumnat comparar dues situacions molt semblants, però en què en la primera (sense airbag ni cinturó) el cos manté el moviment una vegada el cotxe s'atura. Durant un breu instant de temps, el cos continua avançant a velocitat constant (primera llei de Newton), fins que s'estampa contra el parabrisa, aquest li fa molta força i llavors frena bruscament (segona llei de Newton «brusca»). En canvi, gràcies a l'airbag, el cos comença a frenar des del moment mateix que entra en contacte amb l'airbag, ja que rep una força cap endarrere que li fa anar cada cop més a poc a poc (segona llei de Newton «suau»).

En els primers instants, els dos caps es mouen a velocitat constant de 25 m/s, que era la velocitat que duïa el cotxe abans de xocar. D'acord amb la primera llei de Newton, els objectes dins el cotxe mantenen aquest moviment fins que algú els aturi



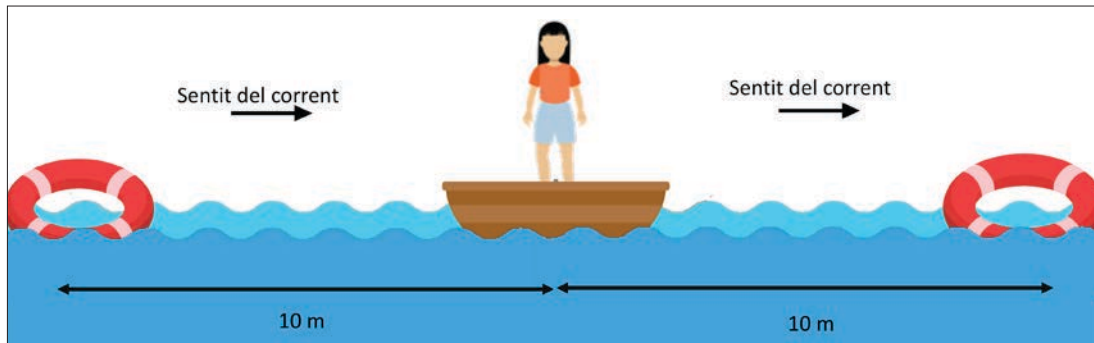
La frenada en el xoc amb *airbag* és més sostinguda en el temps, i la força «es reparteix» en un interval de temps més llarg, per la qual cosa els seus efectes sobre la persona són més suaus

La frenada en el xoc sense *airbag* contra el parabrisa és més brusca, ja que el cap s'atura de cop, i la força és molt més intensa, fet que provoca efectes molt més grans sobre el cos (fractures, lesions i en molts casos la mort).

2.3. La idea que el moviment és sempre relatiu a una referència externa

Abans de començar... Posa a prova les teves idees

Imagina que estàs en un riu molt ample i profund, navegant amb el corrent que t'arrossega, a sobre d'una barca. De cop la barca es comença a enfonsar. Per sort, hi ha dos salvavides que també suren arrossegats pel corrent: l'un es troba riu amunt i l'altre riu avall, tots dos a la mateixa distància de la teva barca. T'has de llançar a l'aigua per arribar a un dels dos salvavides, i fer-ho en el menor temps possible, ja que el riu està infestat de cocodrils.



Tens dues opcions:

- Nedar riu avall, a favor del corrent, i intentar arribar al salvavides de davant.
- Nedar riu amunt, en contra del corrent, però veient com el salvavides darrere teu s'acosta cap a tu.

Ràpid! Què faries?

Llegiu-ho després d'haver respost individualment

Prova, si no ho has fet mai, de plantejar aquesta pregunta en una classe de nois i noies, i veuràs com aviat començaran les discussions acalorades:

- Millor cap endavant, aprofitant el corrent del riu.
- Però el salvavides de davant s'escaparà! Millor cap enrere, a esperar que arribi el segon salvavides.
- I si l'aigua t'arrossega a tu també? Mai podràs arribar-hi.
- Sí, si faig més força que l'aigua.
- Calculem-ho. Jo puc nedar un metre cada segon. Quina és la velocitat del corrent?
- ...

Després d'una estona, proposa als teus estudiants aquesta qüestió: imaginem que, en comptes d'un riu ample i profund, estem en un llac, on no hi ha corrent, i com en el cas anterior, tots dos salvavides estan a la mateixa distància. I si som en una cinta transportadora, que es mou però on no tenim la sensació d'anar contracorrent? A mesura que vagin comprenent de què va el problema, veuràs com els canvien les cares.

2.3.1. El punt de partida de l'alumnat sobre el moviment respecte d'un sistema de referència

Igual com passa amb la idea de força, en les darreres dècades diferents investigacions han caracteritzat algunes idees alternatives i errònies que les persones fem servir de manera espontània per descriure i comprendre el moviment, i que, per tant, són comunes de trobar a les aules de secundària.

a. El sistema de referència «bo»

De manera espontània, les persones tendim a descriure el moviment dels objectes usant sempre com a sistema de referència el d'un observador que està en repòs «absolut», és a dir, situat sobre algun element físic que

associem amb el repòs o la «terra ferma», com ara el terra, l'andana d'un tren, la cuneta d'una carretera, o la vora d'un riu. Si reprenem l'exemple del riu i els bots salvavides, el més útil per resoldre el problema seria pensar que tots els elements s'estan movent a la mateixa velocitat, i que, per tant, estan en repòs entre ells (l'aigua, la barca i els dos bots salvavides). Així, ens podem adonar que és igual nedar cap endavant o cap endarrere, ja que la distància als dos bots és la mateixa. Però aquesta resposta, tot i ser la més simple, no és la més intuïtiva, ja que la nostra ment ens indueix a pensar en aquest moviment fent servir com a sistema de referència la riba del riu, i no la mateixa aigua del riu. Això ens obliga a pensar en moviments més complexos per al nedador, i dificulta la resolució del problema.

Pensar en aquest sistema de referència absolut indueix a creure que tots els objectes tenen un autèntic moviment (amb una velocitat que li és pròpia), i que els altres moviments que es perceben des d'altres sistemes de referència són «enganyos» o «il·lusions» o moviments aparents. Per exemple, si preguntem a un estudiant si un arbre es mou respecte a la finestra del tren, ens dirà «sembla que es mou, però en realitat l'arbre està quiet, i és el tren el que es mou».

b. El moviment només es manté si hi ha contacte físic entre objectes

Quan apareixen situacions en què hi ha un objecte transportat per un altre (pensem, per exemple, l'aigua que transporta una fulla, o unes escales mecàniques que transporten una persona), els estudiants fàcilment aprecien que l'objecte transportat té el mateix moviment que el seu transportador, ja que tots dos es mouen respecte del terra. Però si en algun moment l'objecte i el seu transportador perden el contacte físic, l'objecte «perd» la velocitat que tenia. Per exemple, si la persona que viatja a les escales mecàniques fa un salt vertical, l'alumnat pensa que en caure s'haurà desplaçat lleugerament cap endarrere, ja que durant uns instants haurà perdut la velocitat que tenia.

Aquesta confusió és molt comuna quan es plantegen a l'alumnat problemes com els de la figura 2.11, que representa el moviment d'un paquet d'ajuda humanitària llançat des d'un avió, vist des del terra. Tot i que la resposta correcta és la E, molts estudiants responen la A o la B (si tracten de descriure el moviment vist des de l'avió), o la C (si pensen que, en caure, el paquet perd la velocitat que tenia). Difícilment consideren que el paquet continua portant la velocitat endavant que tenia l'avió, i que la força de la gravetat que el fa caure canvia la direcció d'aquesta velocitat, fet que dona com a resultat la trajectòria parabòlica.

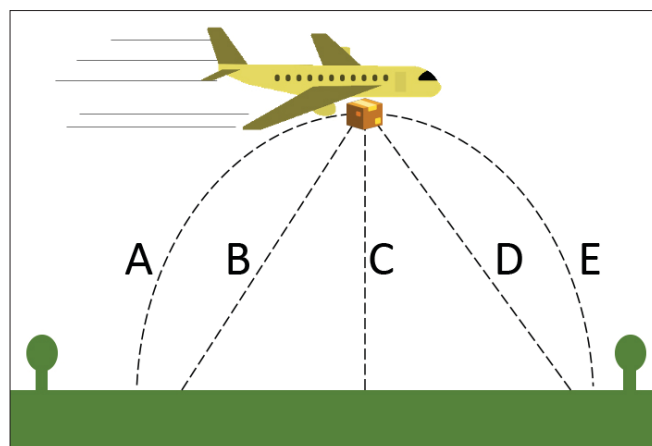


Figura 2.11. Diferents trajectòries d'un paquet. Adaptat del *Force Concept Inventory*.

c. El moviment en un eix depèn del moviment en un altre eix

Una altra dificultat molt comuna per descriure el moviment és la confusió entre les velocitats que té un objecte en dos eixos diferents. Així, si un objecte es mou en l'eix horitzontal d'una manera determinada, això influirà en el seu moviment vertical. Aquest raonament es pot veure en la resposta tipus C i D, en què el paquet cau

diferent a un tir parabòlic (la resposta E). El problema més clàssic en l'ensenyament de la física per tractar aquesta qüestió és el popular «problema del caçador i el mico», molt usat en els cursos de física més avançats (tot i que té un cert interès en els últims cursos de secundària). Originàriament es tractava d'un problema en què calia disparar un mico agafat d'una branca des d'una certa distància, sabent que el mico es deixaria anar de la branca en el moment de sentir el tret. Això obliga a preguntar-se si cal apuntar el mico (opció B del gràfic), o bé una mica més amunt (opció A) o més avall (opció C), per així corregir el tir. Evidentment amb els anys s'ha modificat el context, i es planteja com un exercici de punteria amb un mico de joguina que es deixa caure en el moment exacte del tir.

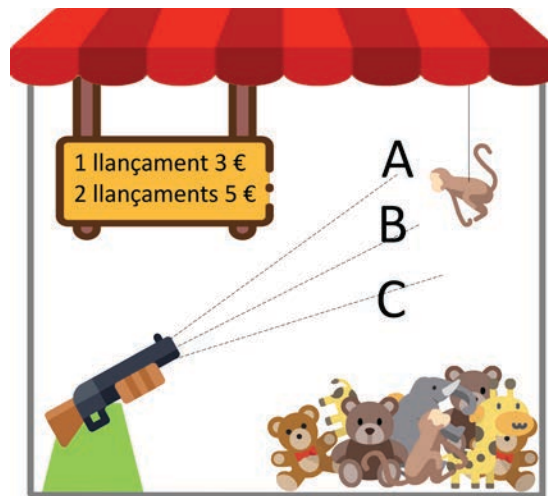


Figura 2.12. Situació problema utilitzada popularment en l'ensenyament de la física per posar a prova la idea de l'alumnat sobre la independència del moviment horitzontal i vertical. Font: elaboració pròpia.

De nou la ment ens juga una mala passada, ja que tendim a pensar que el mico cau en deixar-se anar, però que la bala seguirà la seva trajectòria recta, ja que va tan de pressa que no té temps de caure. Fins i tot hi ha qui pensa que la resposta depèn de la distància entre el caçador i el mico. En realitat el que passa és que la bala i el mico cauen alhora, la bala mentre avança endavant amb la velocitat que hagi assolit dins del canó de l'arma i el mico sense desviar-se i, per tant, el seu canvi de velocitat en l'eix vertical serà el mateix en tots dos casos, per la qual cosa el caçador hauria d'apuntar just al mico.

2.3.2. Com ajudem a construir la idea de sistema de referència?

Per sentir la necessitat d'un sistema de referència abans de començar a parlar de cap moviment és interessant plantejar a l'alumnat situacions en què hagi de descriure un moviment a algú altre perquè l'entengui o el reproduïxi. Això es pot fer jugant a descriure moviments poc convencionals, donant indicacions de recorreguts en el mapa (per exemple, recorregut fins a l'escola) o bé jugant a programar petits robots que requereixen indicacions específiques. També és interessant plantejar situacions que no siguin les intuïtives, i que obliguin a pensar (fent un experiment mental) en sistemes de referència menys comuns com, per exemple: «Com es veu el moviment de la Terra des de la Lluna? I des del Sol?».

Una altra activitat que ajuda a pensar en la necessitat d'un sistema de referència és jugar als plans cinematogràfics, ja sigui gravant-se a si mateixos amb el mòbil, mitjançant animacions *stop motion* o bé amb programes de programació tipus Scratch. Es pot plantejar als estudiants petits reptes, com la creació d'una petita seqüència de dues maneres diferents: fer moure el personatge respecte del fons, o fer moure el fons respecte del personatge. Això obliga a pensar que en el cinema el sistema de referència sempre és la càmera, i ajuda a desmuntar la idea que aquest sigui el terra.

Prova-ho a l'aula

Juguem a orientar-nos per la ciutat (en parelles)

En el mapa a continuació (cal posar el mapa del barri de l'alumnat), tria un recorregut pel teu barri.



1. Trieu conjuntament un punt d'origen i assenyalau-lo al mapa.
2. Pensa individualment un punt d'arribada, i imagina el recorregut que faràs. No senyalis en cap moment aquest punt d'arribada ni en donis pistes al/a la company/a.
3. Escriu el recorregut en un paper, només fent servir paraules. No pots donar referències d'enlloc, només pots definir girs de rotació i distàncies de desplaçament.
4. Passa les instruccions al/a la company/a i que comenci a seguir-les amb el dit. Mentre ho fa no pots donar-li cap pista, ni fer cap gest.
5. Ha arribat al punt que li havies indicat? Quins problemes us heu trobat cadascun de vosaltres en descriure un recorregut?

.....

.....

L'objectiu que persegueix aquesta activitat és que els estudiants prenguin consciència del que implica descriure un moviment, i que requereix definir adequadament la posició inicial, la direcció, el desplaçament, etc. És divertit veure com es confonen, i com el receptor de les instruccions no sempre interpreta el mateix que el que les dicta. El més important és que, en finalitzar l'activitat, es faci una posada en comú de les dificultats experimentades, per així incidir en la importància de descriure els moviments amb un llenguatge precís i concretant alguns conceptes clau com ara posició inicial, trajectòria, distància recorreguda, desplaçament, etc.

2.3.3. A quina versió de sistema de referència volem arribar i per a què?

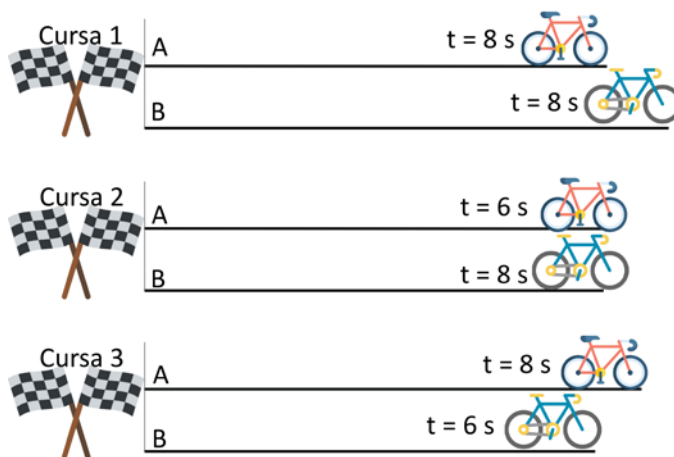
Així, al final de l'escolaritat, un estudiant hauria de ser capaç d'explicar que el moviment dels objectes es defineix sempre respecte a altres objectes, i que no n'hi ha un d'absolut. Tot i que en moltes situacions quotidianes descrivim el moviment respecte al terra com el real, la Terra al seu torn es mou respecte al Sol, i el Sol es mou respecte d'altres punts de l'univers. Quin és, doncs, el nostre moviment de veritat? Això implica també reconèixer la contribució de Galileu a la concepció de moviment relatiu i l'expressió que popularment se li atribueix *E pur si muove*. La seva manera de concebre els moviments va ser clau per canviar els models de moviment planetari. Aplicat a nivell numèric, un estudiant hauria de ser capaç de raonar com es percep el moviment d'un mateix objecte des de diferents sistemes de referència, així com fer petits càlculs del valor de la velocitat en cada cas.

A més, per a aquells estudiants que prossegueixen l'estudi de la física, dominar la idea de relativitat del moviment serà molt útil per caracteritzar moviments més complexos en dues dimensions (MCU, tir parabòlic...), per resoldre problemes de cinemàtica amb diversos cossos alhora, i també per comprendre millor el canvi que implicarà el paradigma relativista quan les velocitats són properes a la de la llum.

2.4. La idea de velocitat com a canvi de posició, i d'acceleració com a canvi de velocitat

Abans de començar... Posa a prova les teves idees

Per a cadascuna de les situacions següents, mostrem dos mòbils A i B. Per a cadascun disposes de la distància recorreguda i el temps que ha tardat a fer-ho. Indica en cada cas quin dels dos cossos A i B va més ràpid.



Llegiu-ho després d'haver respost individualment

Si intentes resoldre aquest problema mentalment, segurament trobaràs que les dues primeres situacions són més simples, mentre que l'última requereix una mica més d'esforç. En la cursa 1), la resposta és força intuïtiva: el mòbil B ha recorregut més distància en igual temps, per la qual cosa va més ràpid. Però també podries confondre't, ja que, com que la línia de A és més curta, la teva ment podria enganyar-te i fer-te pensar que «arriba abans». En la cursa 2), si un domina la relació inversa velocitat-temps, podrà deduir que el mòbil A és el que va més ràpid, però de nou la ment podria enganyar i pensar que tots dos van igual, ja que la longitud és la mateixa. Els raonaments en la cursa 3 són una mica més complexos, ja que cal raonar combinant desplaçament i temps.

Les formes en què les persones raonen en aquest tipus de problemes va ser objecte d'estudi del conegut psicòleg Piaget, que afirmava que fins que maduressin cognitivament era molt difícil que els estudiants poguessin entendre la velocitat en termes d'una relació inversa entre el temps i la distància recorreguda, i que per tant associen més velocitat a més espai recorregut (arribar més lluny), independentment de la durada.

2.4.1. El punt de partida de l'alumnat sobre el concepte de velocitat i d'acceleració

En general, hi ha força confusions respecte a la descripció dels moviments en termes de velocitat i acceleració. Alguns són més comuns en edats més primerenques, com el fet de confondre el «qui va més ràpid» amb el «qui va més lluny». També hi ha confusions entre posició i velocitat, com per exemple el fet de pensar que en una persecució policial o en una carrera, l'instant en què el vehicle del darrere atrapa el del davant ambdós igualen la velocitat, en comptes de pensar que va més ràpid (ja que l'està avançant). No obstant això, com dèiem en l'exemple anterior, aquesta qüestió canvia amb la maduració cognitiva de l'alumnat, quan esdevé capaç de concebre la velocitat com una relació entre posició i temps. No obstant això, en molts casos, l'alumnat continua tenint confusions i dificultats importants, que resumim a continuació.

a. Confusió entre interval de temps i instant

Per descriure els moviments dels cossos en cinemàtica, és imprescindible distingir entre un instant concret de temps i un interval, tant per al raonament qualitatiu com per a la resolució de problemes numèrics, ja que no és el mateix referir-se a la posició o la velocitat en un instant de temps que fer-ho respecte d'un desplaçament o canvi de velocitat durant un interval de temps. Aquesta qüestió no sempre és trivial, ja que la recerca ens mostra que ambdues idees es confonen. Per exemple, si pensem en la descripció del moviment d'una pedra llançada amb un tirador, la pedra experimenta una acceleració durant un interval de temps molt curt (que comença en l'instant en què la deixem anar la goma tensa i acaba en l'instant en què la goma ja no avança més i la pedra se'n separa i segueix el seu camí). Sovint, quan es demana a l'alumnat que descriuï les forces que actuen sobre la pedra, això li costa de fer bé, perquè confon l'interval en el qual la pedra es mou lliure amb l'instant en el qual es comença a moure així.

b. Confusió entre velocitat i acceleració

A partir de certa edat, la velocitat és una magnitud relativament perceptible i manejable, però no passa el mateix amb l'acceleració. Com que és una magnitud derivada de la velocitat i sovint associada a anar ràpid, hi ha una tendència espontània a pensar que ambdues magnituds són iguals, i que un cos que es mou a molta velocitat té també molta acceleració. I també que si està aturat o es mou a poca velocitat, no té acceleració. Això té relació amb la confusió entre velocitat i força que hem detallat al subapartat 2.2.1. Així, a molts estudiants els costa veure que un cotxe que es desplaça en sentit positiu i va frenant té una velocitat positiva que disminueix, i per tant, una acceleració negativa. I en preguntar què passa amb l'acceleració en el mateix instant en què es deixa caure un objecte, com que en els primers instants està encara pràcticament en repòs fins que no adquireix una certa velocitat, a molts estudiants els costa veure que la seva acceleració sigui la de la gravetat. També ens costa veure que la velocitat és relativa, però l'acceleració no (en sistemes de referència inercials). És a dir, que té molt de sentit que no notem la velocitat per alta que sigui si és constant (en un avió, en un tren) perquè tenir-la o no tenir-la depèn des d'on ho miri, però que sempre en notem la frenada o l'acceleració, encara que sigui suau, perquè el canvi de velocitat és independent del sistema de referència des del qual miri.

A més, a totes aquestes confusions cal afegir-hi la complicació que suposa pensar en velocitats negatives (és a dir, amb objectes que s'acosten al sistema de referència en comptes d'allunyar-se'n, o bé que se'n allunyen però en sentit negatiu), ja que encara dificulta més pensar en el canvi de velocitat: si un cos passa de moure's de -30 m/s a -20 m/s, en disminueix la rapidesa i està de fet frenant, però numèricament la seva acceleració és positiva (frena mentre es mou cap a l'esquerra).

c. Dificultat per interpretar gràfiques de posició temps i velocitat temps

Aquesta confusió entre magnituds físiques també es tradueix en dificultats per interpretar gràfiques de posició i temps. Per exemple, una gràfica de velocitat en forma de V invertida sol induir l'alumnat a pensar que l'objecte es mou cap endavant i després cap endarrere, en comptes de pensar que primer accelera i després frena. La recerca ens mostra que la confusió es dona especialment en els pendents negatius.

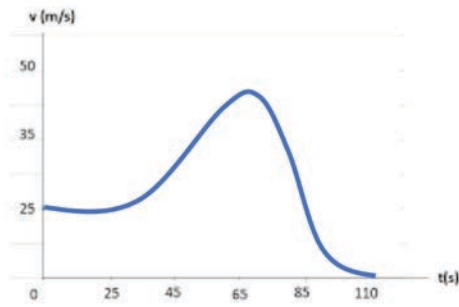


Figura 2.13. Gràfica velocitat-temps que sol induir a confusió: el vehicle sempre es mou cap endavant, però en l'últim interval de temps ho fa cada vegada més lent. Font: elaboració pròpia

2.4.2. Com ajudem a construir la relació entre posició, velocitat, acceleració i temps?

El primer aspecte que cal tenir en compte és que convé no començar usant sistemes de referència que puguin tenir valors negatius, per així simplificar els raonaments. Així, la posició d'un objecte es pot concebre més fàcilment com la distància a l'objecte que actua com a sistema de referència i, alhora, com a origen de coordenades. En aquest sentit, els sensors de distància són especialment útils, ja que permeten raonar en termes de posició com a distància al sensor. La velocitat serà negativa si l'objecte s'acosta al sensor (ja que en redueix la distància), i serà positiva si se n'allunya (n'augmenta la distància). A més, per parlar d'acceleració, convé usar el concepte de rapidesa en comptes de velocitat, ja que l'expressió «es mou cada vegada més ràpid / més lent» evita algunes de les confusions que hem assenyalat anteriorment. Alguns autors proposen, fins i tot, caracteritzar els moviments mitjançant noms divertits, com per exemple «som-hi!» o «a la carrera» per al MRUA amb $a > 0$ o «ja me n'he cansat» per als MRUA amb $a < 0$.

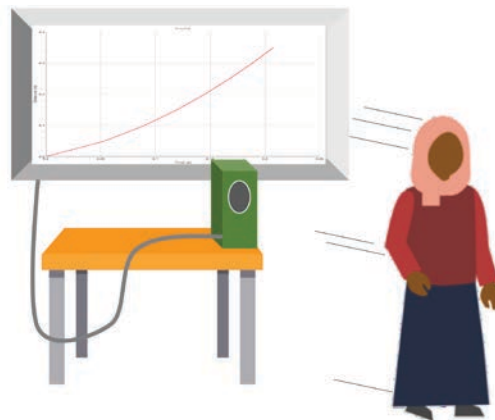


Figura 2.14. Jove acostant-se o allunyant-se del sensor per obtenir una gràfica de posició-temps. El moviment que se li proposa es pot descriure de manera divertida com «som-hi». Font: elaboració pròpia.

Disposar d'un sensor permet jugar a representar gràficament moviments en temps real, mentre estan passant i s'estan visualitzant, i això permet establir un diàleg interessant entre el fenomen (l'objecte que es mou davant del sensor) amb la representació del model (el gràfic cinemàtic). Aquest diàleg es pot fer tant oferint gràfics que els estudiants han de reproduir amb el cos davant del sensor com proposant moviments i elaborant prediccions de com serà la gràfica de moviment, per després comparar-la amb els resultats. Convé plantejar situacions en què acceleració i velocitat no vagin en el mateix sentit, per desmuntar la confusió entre ambdues magnituds que hem plantejat anteriorment.

Si no es disposa de sensor, es pot fer servir una cinta mètrica a terra, o marques que actuïn de referència, i mesurar mitjançant el cronòmetre el temps corresponent a cada posició. A més, es poden simular moviments mitjançant simulacions virtuals, en les quals es pot arrossegar un objecte i obtenir-ne en temps real les gràfiques cinemàtiques, i també dibuixar gràfiques i observar com seria el moviment que hi correspondria.



Figura 2.15. Simulació virtual en què es poden representar a temps real moviments, gràfiques de posició-temps i velocitat-temps. Font: PhET Colorado.

Finalment, si es disposa del temps necessari, és interessant enfrontar els estudiants a representar el moviment mitjançant llenguatges de programació, tipus Scratch, ja que permeten que l'alumnat expressi les idees que té sobre moviment. A la figura següent s'observen dues formes diferents de representar un MRUA, realitzades de manera intuïtiva per estudiants de 14 anys que no havien rebut una instrucció formal de l'equació $x(t) = x_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$, però sí que se'ls havia demanat que representin una animació en què el personatge es mogués cada vegada més ràpid. A la imatge de l'esquerra s'observa una proposta en què per a cada interval de temps del programa, que es defineix amb el comandament d'iteració «repeteix», el personatge es desplaça més passos. A la de la dreta l'estudiant opta per representar diferents desplaçaments cada vegada més curts per així fer obvi que es tracta d'un moviment accelerat (en aquest cas no s'havia treballat encara el concepte d'«uniformement accelerat»). Plantejar aquest tipus de reptes a l'alumnat promou que explicitin les seves idees inicials, i així aquestes puguin ser avaluades i revisades.

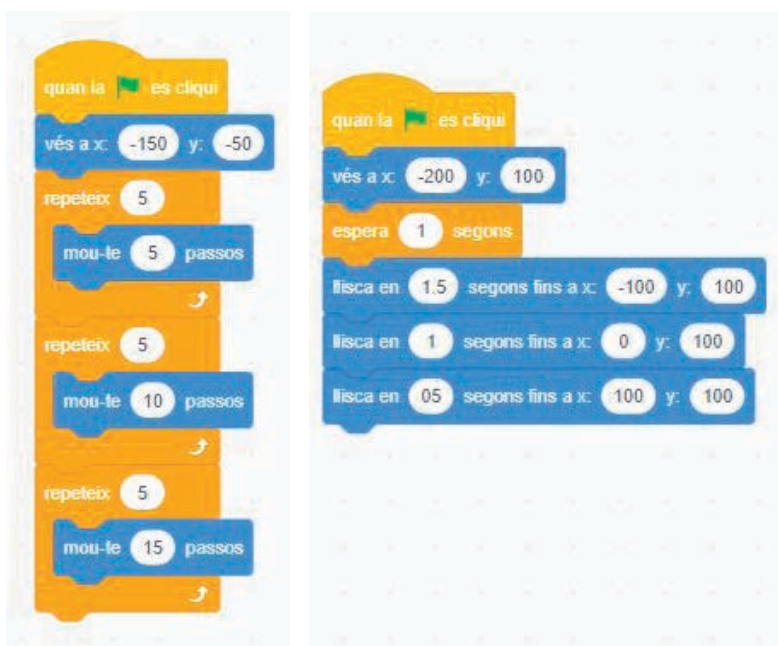
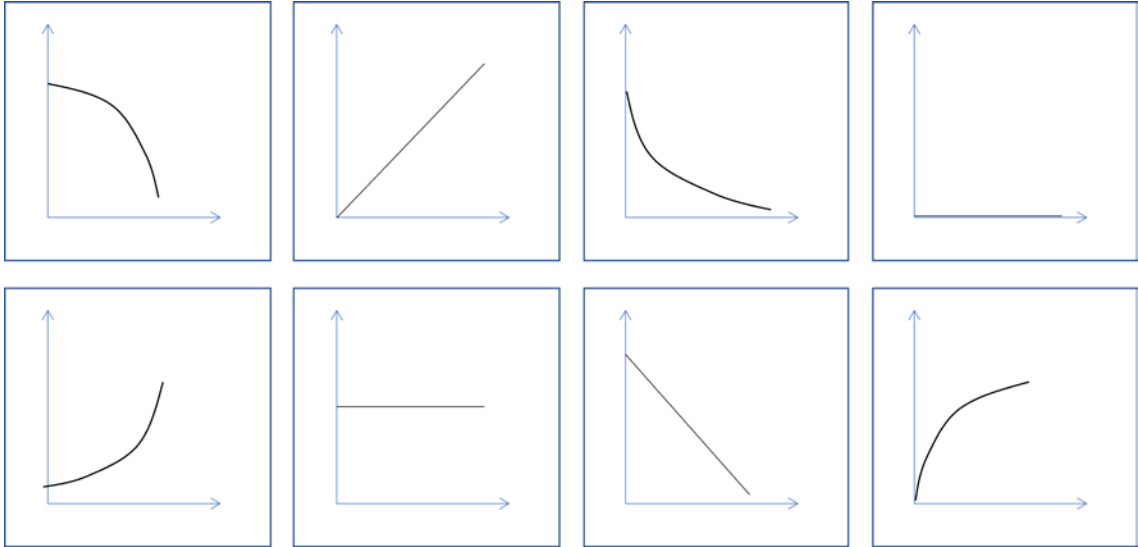


Figura 2.16. Dues maneres diferents d'expressar el moviment d'acceleració d'un vehicle amb el llenguatge de programació Scratch, elaborats per dos estudiants de segon d'ESO de l'INS Pau Vila (Sabadell), dins d'una activitat com la descrita en López-Simó i Hernández (2015). En el programa de l'esquerra, l'estudiant expressa l'acceleració amb desplaçaments més grans per cada unitat de temps, mentre que en el de la dreta aquesta idea s'expressa amb unitats de temps més curtes per a cada desplaçament.

Prova-ho a l'aula

Juguem al «Qui és qui» amb gràfics de posició-temps (en parelles)

1. Disposeu de vuit targetes que corresponen a diferents gràfics de posició - temps. Cadascun de vosaltres n'ha de triar una a l'atzar, sense revelar-ne la identitat.



2. Mitjançant tornos de preguntes, cada jugador/a haurà d'anar descartant targetes, fins a descobrir el moviment triat pel seu oponent.

3. Un cop heu acabat, escriviu breument com li explicaries a un amic/ga que no sabés física com es pot saber a partir d'un gràfic si un objecte s'acosta o s'allunya a l'origen, i si es mou tota l'estona igual o canvia de moviment d'alguna manera concreta.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Mitjançant aquesta activitat, l'alumnat pot caracteritzar els gràfics de moviment a partir d'algunes preguntes simples com ara «'objecte s'acosta a l'origen de coordenades?», cosa que permetrà discutir el sentit del moviment relacionant-lo amb el pendent positiu o negatiu. Una altra pregunta podria ser «es mou tota l'estona igual de ràpid?», a la qual cosa la discussió se centraria en si la gràfica posició-temps correspon a una línia recta o una corba. L'objectiu n'és que l'alumnat s'involucri en una discussió sobre el pendent de la gràfica i la seva relació amb el canvi de posició.

2.4.3. A quina versió de magnituds cinemàtiques volem arribar i per a què?

Al final de l'escolaritat, l'alumnat hauria de saber distingir de manera clara la idea de velocitat i acceleració. Això implica, en primer lloc, comprendre el significat de les unitats amb les quals es mesura la velocitat, i per què en alguns casos es fa en m/s o en km/h, com també saber raonar quina relació hi ha entre ambdues mesures. Al seu torn, esperem que l'alumnat pugui distingir entre la rapidesa amb què es mou un cos (el valor absolut de la velocitat), si s'acosta o s'allunya a l'origen (el sentit de la magnitud velocitat) i, en cas que no sigui constant, la intensitat amb què canvia la rapidesa, anant cada vegada més ràpid o més lent (el valor absolut de l'acceleració). Això hauria de permetre-li entendre gràfics en una dimensió de posició-temps i velocitat-temps, associar el significat adequat als pendents, i també elaborar els seus propis gràfics a partir de l'observació de moviments reals.

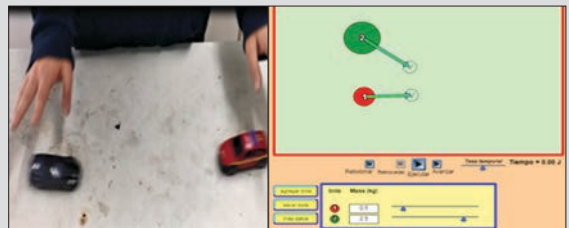
Al seu torn, també esperàriem que fos capaç d'elaborar càlculs senzills sobre la posició d'un objecte o del temps que triga a recórrer una distància determinada, usant les equacions del MRU i el MRUA un cop entesos qualitativament aquests moviments prototípics. En fer-ho, hauria de poder preveure el punt de trobada entre dos cossos que es desplacen a diferent velocitat, sigui perquè es creuen o perquè l'un atrapa l'altre. Això li pot permetre en un futur comprendre i connectar diferents informacions sobre distàncies i velocitats en la vida quotidiana (amb el GPS, amb aplicacions d'activitat física, en programes d'esports de motor o ciclisme, etc.). A més, el fet de comprendre la idea de pendent com a ritme de canvi d'una magnitud pot ser transferible a altres contextos en què es representin altres magnituds.

Per a aquells estudiants que prossegueixin els estudis en física en el batxillerat o en graus universitaris, aquesta base conceptual sobre velocitat i acceleració hauria de permetre capacitar-los per resoldre problemes complexos sobre moviment en què intervenen més d'una dimensió i més d'un cos, com també entendre la relació matemàtica de derivada entre posició, velocitat i acceleració, així com els mètodes de càlcul d'aquestes magnituds mitjançant els pendents i les àrees en un gràfic cinemàtic.

ENSENYAR FORCES I MOVIMENT MITJANÇANT ABP

Un estudi de cas per reconstruir els fets en un accident de trànsit i identificar-ne el culpable

El projecte CRASH proposa als estudiants la resolució de diferents casos ficticis però amb una gran dosi de realisme: escenes d'accidents de trànsit amb diversos conductors implicats, marques a la carretera i declaracions de testimonis. En posar-se en el paper de pèrits judicials, d'advocats i de jutges, els estudiants han d'aprendre conceptes bàsics de força i moviments per acabar fent una reconstrucció el més versemblant possible de quina responsabilitat hi tenen els conductors implicats. El projecte comença amb una primera escena, i involucra l'alumnat a elaborar hipòtesis sobre què ha passat, ja que les versions d'un accident de trànsit dels diferents testimonis són contradictòries. Un cop generada la necessitat de saber-ne més sobre forces i moviments per explicar el que ha passat, els estudiants començaran un curs de pèrits d'accident de trànsit, que durarà unes quantes hores de classe. Durant aquest curs, duran a terme diferents activitats per aprendre a representar gràfics, com ara sortir a córrer al pati de l'institut i cronometrar el temps que es triga a recórrer diferents distàncies.



A la segona part del curs els nois i les noies investiguen sobre els efectes de les forces en el canvi de moviment dels objectes. Per això experimenten tant amb objectes reals com ara cotxes de joguina, com també amb una simulació virtual de col·lisions, anomenada *Collision lab*. Amb aquestes activitats, estableixen algunes relacions com la influència de la massa en el canvi de moviment (segona llei de Newton).

Finalment, un cop superat el curs de peritatge, els estudiants han de presentar el cas que se'ls havia assignat. Mitjançant els coneixements adquirits, han de reconstruir la seva versió de l'accident, i aportar les proves necessàries per convèncer el jutge: vídeos, animacions, gràfics, càlculs, raonaments, etc. En alguns casos, fins i tot, es pot fer un joc de rol en què uns estudiants siguin els advocats de la defensa, d'altres de l'acusació i d'altres actuen de jutges, i tinguin la funció de valorar la veracitat dels arguments aportats pels seus companys.

Per saber-ne més: Domènech-Casal *et al.* (2018), adaptat per López-Simó i Ferrer (2022).

Bibliografia clàssica de referència sobre forces i moviment:

- GUSTONE; WATTS (1985). Chapter 5. Forces and Motion. A DRIVER, R.; GUESNE, E.; TIBERGHEN, A. (ed.). *Children's ideas in science*. Milton Keynes: Open University Press.
- HALLOUN, I. A.; HESTENES, D. (1985). Common sense concepts about motion. *American journal of physics*, 53 (11), 1056-1065.
- HIERREZUELO, J. M.; MONTERO, A. (1991). Capítol 2. Cinemàtica. A: HIERREZUELO, *La ciencia de los alumnos*. Màlaga: Elzevir.
- HIERREZUELO, J. M.; MONTERO, A. (1991). Capítol 4. Las leyes de la dinámica. A: HIERREZUELO, *La ciencia de los alumnos*. Màlaga: Elzevir.
- VIENNOT, L. (2002). Contact, frottement et propulsion. A: *Enseigner la physique*. Brussel·les: De Boeck.

Capítol 3. Ensenyar gravitació i fluids a secundària

En el capítol 2 ens hem centrat en exclusiva en les idees més fonamentals del model de forces i moviment (les lleis de Newton i la cinemàtica). No obstant això, la família de models escolars sobre mecànica també inclou altres models de gran rellevància per entendre una àmplia varietat de fenòmens naturals que s'esdevenen al nostre voltant, com són la dinàmica planetària, la flotació dels cossos, la pressió atmosfèrica i la hidrostàtica. Sovint aquestes temàtiques queden en un segon pla en l'ensenyament de la física en educació secundària, ja que els programes educatius i els esforços docents acostumen a prioritzar l'ensenyament de la física més fonamental, sovint de manera teòrica i idealitzada, assumint que la flotació o la caiguda lliure són aplicacions concretes de la segona llei de Newton. No obstant això, cal tenir en compte que aquestes qüestions no només tenen una gran rellevància en la nostra vida quotidiana, sinó que, a més, han estat clau històricament en la construcció d'una manera de mirar el món basada en la mecànica clàssica. També podria semblar, *a priori*, que la gravitació i els fluids no tenen gaire relació, i que són dues branques inconnexes dins de la mecànica newtoniana. Des del nostre punt de vista això no és així, ja que el comportament dels fluids que observem a la superfície de la Terra ve donat per l'atracció que la Terra hi exerceix, sense la qual no existiria ni la força d'empenta ni la pressió hidrostàtica tal com la coneixem. A més, les idees de l'alumnat sobre gravitació i fluids també mantenen una certa relació, com veurem al llarg del capítol.

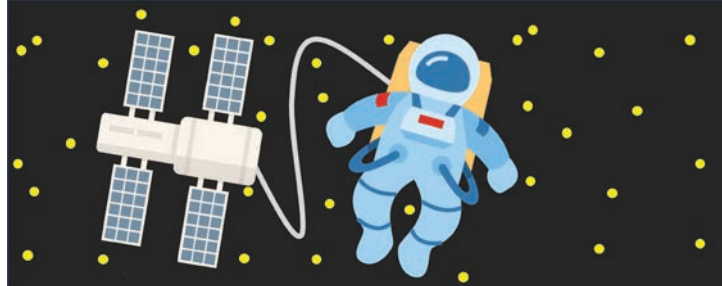
Així doncs, en aquest capítol ens centrarem en el que considerem les tres grans idees sobre gravitació i fluids que cal construir al llarg de la secundària:

1. La idea de gravetat com a interacció entre masses.
2. La idea de comportament dels fluids d'acord amb les diferències de pressió.
3. La idea de flotabilitat com a equilibri entre el pes i l'empenta.

Al llarg del capítol desenvoluparem aquestes diferents idees clau, i analitzarem quines concepcions i idees alternatives n'acostuma a tenir l'alumnat, de quina manera podem desenvolupar-les a l'escola a través d'activitats didàctiques, i ens centrarem a relatar alguns exemples pràctics assenyalats en la literatura com d'especial interès.

3.1. La idea de gravetat com a interacció entre masses

Abans de començar... Posa a prova les teves idees



Deus haver vist alguna imatge feta des de l'estació espacial internacional, que es troba en òrbita al voltant de la Terra. S'hi veuen els astronautes «flotant». Creus que a aquests astronautes els afecta la gravetat de la Terra? Prova d'explicar, fent servir les teves pròpies paraules, com pot ser que els astronautes, en entrar en òrbita al voltant de la Terra, experimentin aquesta sensació d'ingravedesa?

Llegiu-ho després d'haver respost individualment

Si plantejes aquesta qüestió a l'alumnat, les respostes a la qüestió de la ingravedesa solen ser de diferent índole. En primer lloc, trobem aquelles que afirmen que l'astronauta flota perquè «la gravetat és molt petita», o fins i tot perquè «no hi actua la força de gravetat». Això és rotundament fals, ja que l'estació se situa a uns 400 km de la Terra, per la qual cosa el valor de la gravetat amb prou feines es redueix un 10% respecte de la superfície de la Terra, el famós $9,8 \text{ m/s}^2$. De la mateixa manera, altres vegades trobem respostes com que «la força de la gravetat es compensa amb la força centrífuga que experimenta l'astronauta en girar». Com ja hem dit a l'apartat 2.2.1, no hi ha aquesta força perquè no hi ha cap interacció amb la qual la puguem associar. El que notem com a força centrífuga és la inèrcia dels cossos en rotació, per la qual cosa tampoc no podríem donar per vàlida aquesta explicació.

Per respondre a aquesta qüestió de manera adequada, cal entendre que l'astronauta, juntament amb la resta de l'estació espacial, estan caient a temps real sobre la Terra. En estar caient constantment, deixen d'existir-hi forces que suportin verticalment uns objectes sobre els altres, cosa que genera la sensació d'ingravedesa. Però si estan caient, per què no cauen «de veritat» com en una caiguda lliure, en línia recta cap a la Terra? El motiu pel qual l'estació espacial no es precipita contra la superfície de la Terra és que disposa d'una velocitat perpendicular al radi de la seva òrbita. La força gravitatòria que experimenta tant l'astronauta com l'estació els provoca, però, un canvi del moviment: tot i que no canvien la rapidesa, sí que en canvia la direcció de la velocitat que porten. És el que provoca que continuï girant constantment. De fet, en absència de gravetat, deixarien d'orbitar; i seguirien el seu moviment en línia recta, amb la qual cosa s'allunyarien indefinidament de la Terra.

3.1.1. El punt de partida de l'alumnat sobre gravetat

La gravetat ha estat una de les idees que ha suscitat més interès en la didàctica de la física, ja que les idees alternatives de l'alumnat són moltes i molt variades. Els infants comencen a experimentar amb la gravetat de ben petits, llançant objectes a terra una vegada i una altra.

a. Les coses cauen pel seu «propi» pes

Una de les principals dificultats per entendre la idea de gravetat és que el raonament espontani ens indueix a no problematitzar la caiguda dels cossos, és a dir, a no necessitar una raó, com ara una empenta o una estirada, perquè caiguin. Així, es parla de la caiguda dels cossos com si es tractés d'una propietat dels objectes. Segons aquest raonament, els objectes tendeixen de manera natural a caure sense necessitat que ningú els empenyi, i només s'aturen quan alguna cosa els aguanta (una superfície rígida, una corda, un líquid que els permet flotar, etc.). Aquesta manera de raonar, de fet, va ser la base de les explicacions que es feien servir a la Grècia clàssica

per explicar el moviment dels objectes, cosa que al llarg del llibre anomenem la física aristotèlica. Segons aquest paradigma, no només existiria el pes o la gravetat com la propietat dels objectes «pesants» de caure (per exemple, pedres, llibres...), sinó que també es considera que hi ha la propietat d'altres objectes «lleugers» de flotar (com ara els núvols, les volves de pols, etc.).

Trencar amb la concepció de pes com una propietat dels objectes és extremadament complex, ja que l'ús del terme «pes» en la vida quotidiana no hi ajuda gaire. Popularment es denomina pes el que en la física formal és la massa («jo peso 60 kg», «la bossa de la compra pesa 3 kg», etc.). Per a més confusió, també s'associa el pes al que mesura la bàscula, que, com ja vam veure a l'apartat 2.1.2., no és sinó la força que fa la bàscula sobre el cos amb què interactua, i que pot coincidir o no amb el pes en funció de com s'hi recolzi.

Un altre problema associat a la confusió entre massa (propietat) i pes (interacció entre objectes amb massa) és la idea que els objectes més pesants (és a dir, amb més massa) cauen més de pressa. Superar aquesta idea al llarg de la història de la humanitat no ha estat gens fàcil, i només cal pensar en les icòniques experiències de Galileu llançant objectes de diferent massa per adonar-se de com n'és, de difícil, desafiar la nostra percepció. En la nostra percepció quotidiana és cert que observem que objectes més massius solen caure amb més velocitat. Això succeeix, per exemple, si deixem caure alhora una peça metàl·lica com un cargol i un tros de paper. No obstant això, l'explicació no és pel pes amb què la Terra atrau tots dos objectes, sinó pel fregament amb l'aire que, proporcionalment al pes, és molt més gran en el cas del paper. De fet, en els raonaments espontanis de l'alumnat és comú trobar expressions com «tenen la mateixa acceleració de la gravetat, però per a mi un cau més ràpid que l'altre». I és que aquesta manera intuïtiva de raonar impregna moltes situacions de les nostres vides, com es mostra en el següent còmic infantil:



Figura 3.1. Vinyeta infantil que mostra la idea comuna i errònia de que els objectes amb més massa cauen abans.

Font: Carrascosa (2006).

b. La gravetat empeny els objectes cap «avall»

Si ens limitem a interpretar què passa en un lloc concret (per exemple, dins d'una habitació, en un laboratori, en un parc, etc.), aquesta afirmació té un cert sentit i pot ser de gran utilitat. El problema arriba quan intentem extrapolar l'afirmació a escala planetària, especialment per als que ens hem criat a l'hemisferi nord. Si la gravetat empeny els objectes cap avall, com s'aguanten les persones a l'hemisferi sud? Aquesta pregunta és potser una de les comunes respecte a l'educació primària (com a mínim a Europa), i no sempre acaba amb una explicació racional i satisfactòria, sinó més aviat amb una acceptació acrítica imposada per la rotunditat de les evidències, i que en alguns casos acaba derivant en tota la família de teories alternatives de tipus terraplanista.

Així, de manera intuïtiva, en la nostra primera infància tendim a pensar que el terra (no el planeta, sinó el sòl sobre el qual vivim) és una cosa plana, i que sempre està «sota» nostre. Quan comencem a tenir contacte amb les representacions esfèriques del planeta Terra, sigui amb globus terraquius, maquetes o imatges, acos-

tumem a revisar el nostre model mental. En alguns casos nens i nenes pensen que viuen en un pla, i que al cel hi ha el planeta Terra ben rodó girant al voltant del Sol. En altres, que la Terra és esfèrica, però només és possible habitar-ne la part superior. També hi ha alumnes que, tot i que assumeixen que la Terra és habitable en tota la seva superfície, creuen que hi continua havent una direcció vertical privilegiada, de manera que, si existís un forat que travessés el planeta de nord a sud, podríem deixar caure-hi un objecte i aquest creuaria la Terra i continuaria baixant «cap avall». Aquesta idea, que podríem anomenar irònicament «clavegueró universal», es manté present en les formes de raonar de l'alumnat a secundària. Les cosses cauen cap avall, assumint que hi ha un avall per a tothom igual.

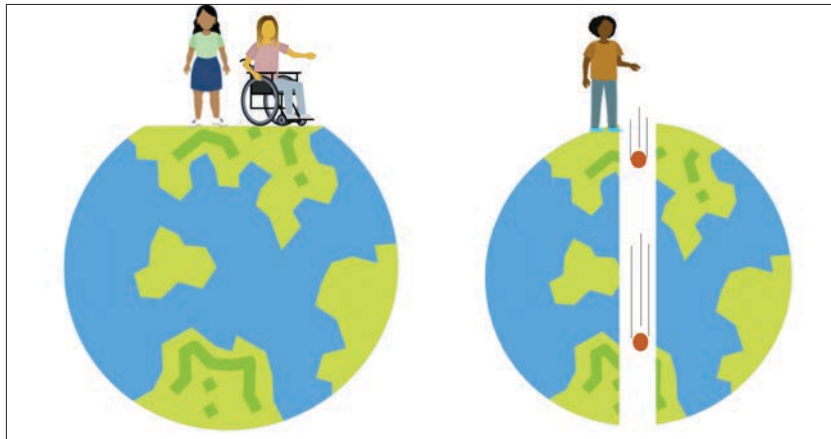


Figura 3.2. Models mentals resultants de pensar que la Terra és esfèrica, però que la gravetat va cap avall. Adaptació de Nussbaum i Novak (1976).

c. La gravetat és conseqüència de l'atmosfera terrestre

L'associació entre atmosfera i gravetat és, també, una confusió molt comuna entre l'alumnat en totes les etapes de l'escolaritat, sota la premissa que és l'atmosfera la que provoca la caiguda dels cossos cap avall. Una de les explicacions possibles a aquesta confusió segons la investigació didàctica és la comparativa sobre què passa a la superfície de la Terra i a l'espai exterior. En el primer cas, hi ha atmosfera i gravetat, mentre que en el segon no hi ha ni atmosfera ni gravetat, tal com es pot veure en infinitat de pel·lícules. Per tant, mitjançant una simple associació causal (errònia, però no per això menys comuna), és fàcil concloure que és l'atmosfera la que provoca la gravetat. A més, la idea que la pressió atmosfèrica actua sobre nosaltres també acostuma a induir a aquesta confusió: en preguntar a nois i noies en els primers cursos de secundària sobre què li passaria a un cos dins d'una càmera de buit absolut, una de les respostes és que aquest cos flotarà o que saltarà sense esforç com a la Lluna. El més irònic d'aquesta idea alternativa és que el raonament invers sí que és cert: l'atmosfera terrestre és conseqüència de la gravetat. Els gasos que conformen l'atmosfera es mantenen sobre la superfície de la Terra per l'atracció que en reben. Sense gravetat, aquests gasos s'expandirien per l'espai.

d. La gravetat només actua a prop de la superfície de la Terra

Finalment, podem identificar una altra idea alternativa especialment comuna en els darrers cursos de la secundària, quan les altres idees errònies ja han estat superades. Un cop l'alumnat ja ha entès que la Terra exerceix una força sobre els cossos, i que aquesta força (el pes) apunta cap al centre del planeta, continua apareixent una altra explicació: quan els cossos s'eleven prou —com en el cas dels satèl·lits en òrbita— sí que aconsegueixen escapar-se de la gravetat. És cert, com dèiem en la pregunta amb què obríem la secció sobre gravitació, que la intensitat del camp gravitatori decreix amb la distància, i que, per tant, els cossos que orbiten sobre la Terra a una certa distància reben una gravetat menor. Però continua havent-hi una acció de la gravetat, suficient per empènyer els objectes cap a l'interior de la Terra. El fet que no caiguin, com discutíem

a l'inici de la secció, no és per l'absència de la gravetat, sinó perquè porten una certa velocitat (gràcies al sistema de motors que els ha enlairat) tangencial a la superfície de la Terra. En portar una velocitat tangencial a la superfície de la Terra mentre aquesta els atreu, se'n va modificant de manera contínua la trajectòria i es pot generar un moviment circular al voltant del planeta. De fet, si nosaltres fem girar a l'aire una pilota lligada amb una corda, podem veure que si deixem anar la corda (deixem de fer força cap al centre de la trajectòria) l'objecte surt disparat amb la velocitat que porta.

3.1.2. Com ajudem a construir la idea de gravetat?

Hi ha una àmplia varietat d'activitats i experiments orientats a desafiar la idea intuïtiva que els objectes més massius cauen abans *per se*, que poden agrupar-se en dos tipus: comparar la caiguda de dos objectes d'igual massa i diferent forma, i comparar la caiguda de dos objectes d'igual forma i diferent massa. En el primer cas, podem proposar a l'alumnat que compari la caiguda de dos fulls de paper idèntics, un d'ells llis i l'altre arrugat en forma de bola. També podem proposar que comparin la caiguda de dos fulls llisos, però col·locant un d'ells damunt d'un altre objecte (per exemple, un llibre o una carpeta). En tots dos casos, veuran que el full llis planeja i triga més a caure, no per la seva diferent massa, sinó per la seva diferent interacció o fregament amb l'aire.

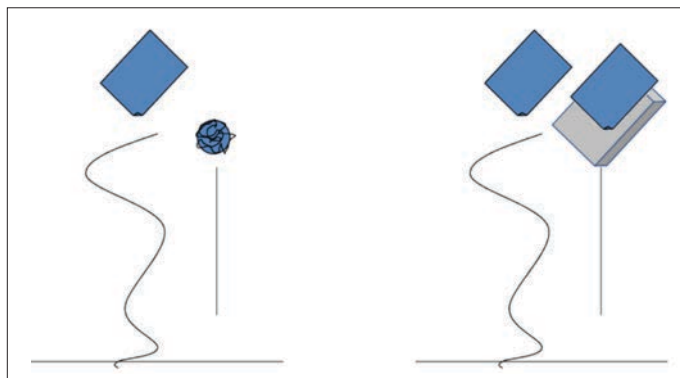


Figura 3.3. Dos experiments per comparar la caiguda d'un full de paper amb diferents fregaments amb l'aire, primer comparant un paper llis amb un d'arrugat, i després un paper sol amb un paper sobre un llibre o carpeta.

Font: elaboració pròpia.

En paral·lel, per comparar caigudes de diferent massa i igual forma podem jugar a omplir diferents objectes (caixetes d'ou sorpresa, caixetes dels antics rodets de fotos, etc.), de manera que sempre hi hagi un objecte buit o farcit d'alguna cosa lleugera (cotó, serradures...), i un altre de farcit de coses més denses, com objectes metàl·lics, pedres, etc. L'experiència d'observar que tots dos objectes idèntics en forma però de diferent massa cauen alhora (reproduint així els famosos experiments dels renaixentistes Simon Stevin i Jan de Groot) és tan antiintuïtiva que possiblement els teus estudiants buscaran altres explicacions: «Profe, és que has deixat caure una mica abans l'objecte més lleuger», o bé faran servir inconscientment el seu biaix de confirmació per observar petites diferències en la caiguda, ja que és un fenomen que s'esdevé ràpid per a l'ull humà, i els rebots i soroll de tots dos cossos sobre el terra solen ser diferents (ja que encara que tinguin la mateixa velocitat, tenen diferent energia cinètica!). Per aquest motiu, és important que repeteixin l'experiment diverses vegades i des d'alçades apropiades (per exemple, des de sobre la taula), que ho facin en petits grups, que registrin els moviments amb la càmera d'un telèfon mòbil, que usin —si en disposen— l'opció de càmera lenta, que es faci l'experiment sobre una caixa de serradures o un bloc de plastilina gran, etc. L'objectiu d'aquests experiments és ajudar a superar la idea que el temps de caiguda depèn de la massa, i que comprenquin que depèn de la forma, de manera que els objectes amb una força de fregament significativa respecte del seu pes experimentaran una acceleració menor que la de la gravetat.

El racó de pensar

Compte amb «demostrar» matemàticament que l'acceleració no depèn de la massa!

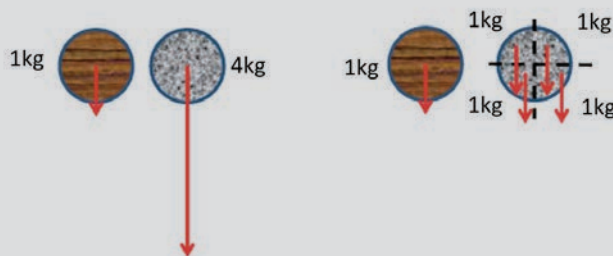
Una manera de resoldre el conflicte de la dependència de les masses en l'acceleració dels cossos en una caiguda lliure és plantejar la segona llei de Newton, en què la força que provoca l'acceleració és P , que al seu torn es defineix com a $m \cdot g$. Així, en el cas d'un objecte en caiguda lliure sobre el qual actua només una força $F = P$, com que això ha de ser igual a $m \cdot a$ segons la segona llei, s'elimina la m en ambdues bandes de l'equació, i s'obté que $a = g$.

$$\begin{array}{c}
 p = m \cdot a \\
 m \cdot g = m \cdot a \\
 \cancel{m} \cdot g = \cancel{m} \cdot a
 \end{array}$$

Aquest raonament és vàlid matemàticament, però no és gens trivial físicament, ja que la variable massa té dos significats ben diferents a banda i banda de l'equació:

1. $P = m \cdot g$ expressa la idea que l'atracció gravitatòria, és a dir, la força que sentim en presència d'altres masses (en aquest cas la Terra), és proporcional a la nostra massa. És a dir, que els objectes amb més massa experimenten una força d'atracció mútua objecte-Terra major. Estaríem parlant, per tant, de la massa gravitatòria o la capacitat que tenim d'interactuar amb altres masses (interactuar gravitatòriament).
2. $F = m \cdot a$ expressa la segona llei de Newton, és a dir, la resistència dels cossos a canviar l'estat de moviment. Els objectes amb més massa experimenten una acceleració menor quan estan sotmesos a una força F . Aquí, m representa la massa inercial. Aquesta inèrcia és igual per a un cos donat de massa m sigui quina sigui la força que se li faci, que pot ser força gravitatòria o una altra.

Combinant ambdós significats de m , el que estem expressant amb l'equació anterior és que els cossos amb més massa experimenten una força d'atracció més gran, però, al seu torn, oposen més resistència a canviar el moviment, de manera que ambdós efectes es compensen. Una manera d'abordar aquesta igualtat amb sentit físic és pensar els objectes més massius com a conjunts d'objectes menys massius, tal com es mostra en la imatge següent. Si pensem en un objecte de 4 m com quatre objectes d'1 m, ens pot ajudar a pensar que, negligint el fregament, tots cauen amb la mateixa acceleració del que cauria un cos de massa 1 m. Si bé el cos 4 m rep una força d'atracció quatre vegades més gran, també té quatre vegades més resistència a canviar de moviment. És a dir, la Terra estira més de l'objecte més massiu, però l'objecte més massiu també costa més de moure.



L'equivalència entre els moviments de caiguda lliure i d'òrbita també és una mica complex, ja que requereix desafiar de nou el sentit comú. Per a això convé visualitzar vídeos de caigudes prou llargues en què es pugui observar la mateixa sensació d'«ingravedesa» que la que s'experimenta en una estació espacial: en salts olímpics, en acrobàcies aèries abans que s'obri el paracaiguda, atraccions de fira amb caigudes, etc.



Figura 3.4. Un grup d'acròbates no cauen més de pressa que un de sol (tot i que junts sumen més massa), de la mateixa manera que un cos més massiu tampoc ho fa més ràpid que un altre de més lleuger.

Font: elaboració pròpia.

També és útil proposar a l'alumnat experiments mentals, en què imaginin què passaria si saltessin des de molta alçada un estudiant damunt d'un altre, perquè visualitzin que durant la caiguda deixarien de fer-se força entre ells (el de sobre deixaria de recolzar-se en el de sota). Un altre experiment mental molt interessant és el famós canó de Newton (figura 3.5), que consisteix a imaginar el llançament horitzontal d'una bola de canó des del capdamunt d'una muntanya, amb diferents velocitats. A més velocitat, més gran seria l'abast, fins al punt que la curvatura de la trajectòria coincidiria amb la de la Terra, cosa que faria que l'objecte passés a estar en òrbita.

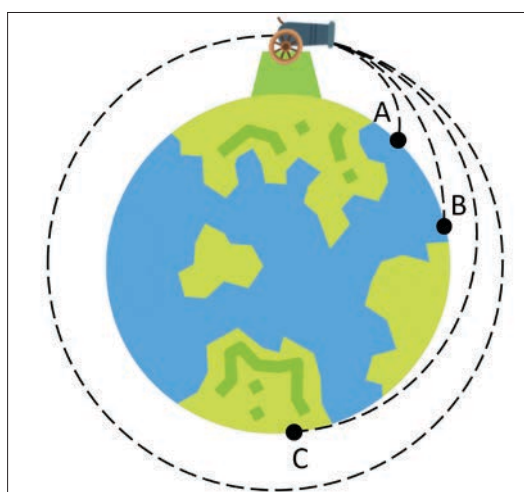


Figura 3.5. Representació del canó de Newton, proposada pel físic anglès per explicar l'equivalència entre la caiguda lliure i l'òrbita. Elaboració pròpia.

3.1.3. A quina versió de la idea de gravitació volem arribar i per a què?

Al final de l'escolaritat, un estudiant hauria de ser capaç de concebre la gravetat no com una propietat dels cossos (i molt menys una propietat només dels cossos més pesants), sinó com una interacció amb la Terra que experimentem de manera permanent pel fet de tenir massa. Els objectes que tenen més massa experimenten una força més gran (per la qual cosa costa més aguantar-los o aixecar-los), però no per això cauen més de pressa quan se'ls deixa caure, ja que també es resisteixen més a canviar de moviment. Si el cos experimenta una força de fregament rellevant que s'oposa a la força pes, aquest cau amb menys acceleració. A més, a escala mesoscòpica sí que podem trobar cossos en suspensió a l'aire (volves de pols, aerosols, partícules de cendra, pol·len, etc.), però això es deu a forces de convecció de l'aire que contraresten el pes.

Quan els objectes es troben en caiguda lliure (és a dir, no estan sustentats), experimenten el que anomenem «ingravedesa», que no significa absència de gravetat, sinó absència de forces que contrarestin la gravetat. Això s'esdevé tant en caigudes verticals (un ascensor sense cable, una atracció de fira, un salt en paracaigudes, etc.) com en una òrbita espacial (d'un satèl·lit artificial sobre la Terra, de la Terra sobre el Sol, etc.). L'única diferència entre tots dos és que, mentre que el primer tard o d'hora arribarà a terra, la velocitat tangencial del segon tipus de casos provocarà un moviment circular que podria ser perpetu si no hi ha fricció.

Poder superar les idees alternatives sobre gravitació hauria de permetre al nostre alumnat ser crític davant de teories negacionistes com el terraplanisme, fortament sustentada en concepcions errònies de la gravetat, o bé no caure en enganys com els que es van viralitzar el 2020 amb el famós *Broomstick Challenge*, que proposava a la gent que comprovés que l'escombra s'aguantava dreta un dia concret de l'any, a causa del fet que aquell dia la Terra s'alineava amb un suposat eix de gravetat universal. La mateixa NASA va haver de sortir a desmentir aquesta notícia falsa a través de les xarxes socials.



Figura 3.6. Captura de pantalla del perfil en una xarxa social de la NASA en què es desmenteix una teoria alternativa segons la qual la Terra s'alinea amb un suposat eix de gravitació universal. Font: NASA.

Aquells estudiants que prossegueixin els estudis de física s'hauran d'enfrontar a noves idees una mica més complexes, com la idea de camp gravitatori i de potencial gravitatori. Hauran de fer el salt de l'energia potencial gravitatòria com

$$E_{pg} = m \cdot g \cdot h$$

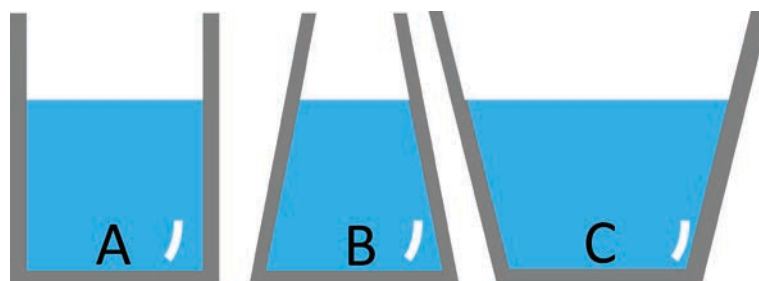
a una energia potencial com $E_{pg} = -G \cdot \frac{M \cdot m}{r}$,

i assumir que la primera és un cas particular aplicat a la superfície de la Terra. Això implica comprendre que el potencial gravitatori i l'energia potencial gravitatòria tenen valors negatius, ja que fan referència a una interacció que dificulta el lliure moviment dels cossos. Si durant el seu ensenyament obligatori han construït una primera versió de gravetat, fer aquest salt els serà molt més natural que si simplement han memoritzat les equacions i com aplicar-les en exercicis rutinaris sense entendre'n el significat.

3.2. La idea de comportament dels fluids d'acord amb les diferències de pressió

Abans de començar... Posa a prova les teves idees

Imagina que disposes de tres recipients plens d'aigua A, B i C, com els de la figura següent. El fons dels tres recipients té la mateixa mida i ocupa la mateixa superfície. L'aigua dels tres recipients arriba fins al mateix nivell.



La força que exerceix l'aigua sobre el fons del recipient és...

1. Més gran en el recipient A que en els altres.
2. Més gran en el recipient B que en els altres.
3. Més gran en el recipient C que en els altres.
4. Igual en els tres recipients.

Llegiu-ho després d'haver respost individualment

Aquest problema és denominat per alguns autors la paradoxa hidrostàtica, ja que la pressió a l'interior d'un fluid només depèn de l'altura de l'aigua, i no de la forma del recipient, i va ser àmpliament discutit pels científics del segle XVII. Si suposem, a més, que el fons dels tres recipients és igual, podem afirmar que la força que exerceix l'aigua és exactament la mateixa. Aquesta resposta és poc intuïtiva, i és comú observar en l'alumnat respostes que afirmen que la pressió de l'aigua és més gran en el recipient C, ja que el volum i la massa totals d'aigua que empeny cap al fons són més grans que en els dos recipients anteriors. També hi pot haver estudiants que afirmen que la pressió de l'aigua és més gran en B, ja que la inclinació de les parets contribueix a empenyer l'aigua cap avall, per la qual cosa resulta una força més gran en B.

3.2.1. El punt de partida de l'alumnat sobre la pressió en els fluids

Els fluids són entitats físiques amb algunes propietats sorprenents, que resulten poc intuïtives per a l'alumnat. És difícil imaginar que hi hagi unes lleis físiques que permeten explicar alhora el comportament de l'aigua i de l'aire, ja que a primer cop d'ull semblen dues substàncies amb comportaments molt diferents. En la nostra primera infància ens costa percebre la simple existència de l'aire, que relacionem només amb el seu moviment (el vent, les ràfegues, la respiració i el bufec, etc.), però ens és difícil imaginar que en buidar una ampolla d'aigua en realitat aquesta no queda buida perquè en sortir-ne l'aigua es va omplint d'aire. Amb els anys anem construint una idea de pressió basant-nos en la nostra experiència personal (per exemple, quan ens submergim en una piscina) i en l'ús social que es dona al terme (com ara en la informació meteorològica). Així, en arribar a secundària, solen haver-se construït algunes idees alternatives, que resumim a continuació.

a. La pressió dins dels fluids depèn de la forma del recipient

Tal com hem vist en l'exemple anterior de la paradoxa hidrostàtica, resulta poc intuïtiu pensar que en el fons dels tres recipients A, B i C la força que fa l'aigua és la mateixa, ja que tendim a pensar que la força que rep un cos submergit en un fluid depèn del volum de fluid que es troba per sobre, quan, en tot cas, la pressió

dependria de l'altura de la columna d'aigua, independentment de l'amplada del recipient. Quan preguntem a l'alumnat quin dels dos peixos de la figura 3.7 està sotmès a més pressió, possiblement mostrin dubtes, fins i tot aquells estudiants que declarin d'entrada que la pressió només depèn de la profunditat, ja que la presència de la cova dificulta aquest raonament. Per a uns, a causa de la cova disminueix la quantitat d'aigua damunt del peix de la dreta, mentre que per a d'altres la cova afegeix massa sobre del peix de la dreta.

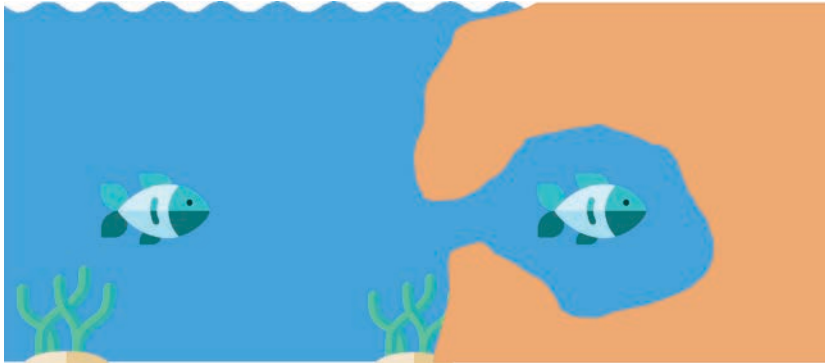


Figura 3.7. Imatge que permet discutir amb l'alumnat la idea de pressió i els factors que hi intervenen. Adaptació de Besson (2001).

b. Els fluids exerceixen pressions diferents en les diferents direccions

Una altra dificultat que experimenta l'alumnat és respecte a la direcció amb la qual s'exerceix pressió, tal com es va identificar en estudis que analitzaven les respostes dels alumnes a la pregunta de quina era la pressió que experimentava una boia submergida dins de l'aigua en els quatre punts marcats a la figura 3.8.

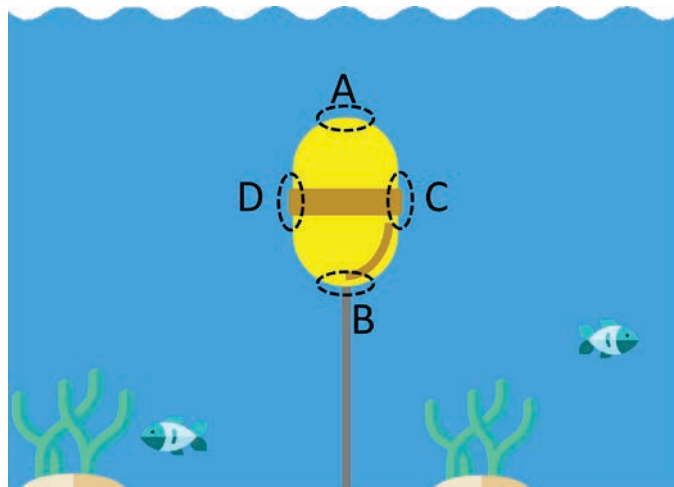


Figura 3.8. Diagrama d'una boia submergida que permet discutir com és la pressió que actua en diferents punts. Adaptació de Viennot (2003).

Una de les respostes més comunes era que en els quatre punts A, B, C i D la pressió era la mateixa, ja que el cos estava totalment submergit i, per tant, tota la boia estava igual de submergida en l'aigua. Pensar d'aquesta manera dificultarà, com veurem en l'apartat 3.3.1, pensar en la força d'empenta, que és clau per explicar la flotació. Una altra resposta que ofereix l'alumnat és que solament existeix pressió en els punts A i B (en alguns casos, sent $P_A = P_B$, i en altres $P_B > P_A$), amb la qual cosa s'obvia que el fluid exerceix pressió en totes les direccions possibles.

c. Explicacions centrades en una única pressió, no en diferència de pressions

Si mirem d'explicar per què podem empènyer, per exemple, una pilota de ping-pong quan bufem a través d'una palleta de xuclar, ens serà força intuïtiu pensar que en bufar incrementem la quantitat d'aire que flueix per la palleta, i per tant la pressió que aquest aire fa sobre l'objecte. Aquesta pressió provoca una força sobre la pilota ($P = F/S$) i, en conseqüència, un canvi en el seu moviment que provocarà que s'allunyi de nosaltres. Però, si tractem d'explicar per què podem absorbir aquesta pilota de ping-pong amb la mateixa palleta, la cosa es complica, ja que ha d'existir una força en sentit contrari, és a dir, capaç de moure la pilota cap a nosaltres, és a dir, «absorbir-la». I no veiem qui o què pot fer aquesta força! Si la pilota estigués lligada amb un fil i poguéssim estirar-la, no tindríem aquest problema, cosa que porta l'alumnat a pensar de manera intuïtiva que amb la boca aconseguim fer una força cap a nosaltres en comptes de pensar que en absorbir l'aire el que provoquem és menor pressió sobre la pilota, i que és aquesta diferència de pressions el que fa que hi hagi una força resultant cap a nosaltres.

3.2.2. Com ajudem a construir la idea de pressió i diferències de pressió en els fluids?

Una de les raons que dificulten la comprensió de la pressió en els fluids és pensar en aquesta magnitud a escala macroscòpica, com si la força que experimenta una superfície fos homogènia. L'ús d'equacions com $P = F/S$ pot ser útil quan comparem la pressió associada a una mateixa força aplicada en diferents superfícies (per exemple, en el típic cas de per què una persona amb esquís no s'enfonsa tant a la neu com una persona sense esquís). Per això hi ha experiències senzilles però il·lustratives, com la simple acció d'intentar comprimir un llapis amb dos dits fent el màxim de força possible i sense moure'l. L'alumnat ràpidament percebrà que el costat punxegut (on la força es fa contra una superfície petita) li provoca molt més dolor al dit, tot i que la força que realitza és la mateixa (el llapis no es mou).



Figura 3.9. Persona prement un llapis per dos extrems amb diferent superfície de contacte. Tot i fer la mateixa força, la punta del llapis exerceix molta més pressió sobre el dit que l'extrem. Font: elaboració pròpia.

No obstant això, per orientar l'alumnat en la construcció de la idea de fluid, convé treballar amb fenòmens hidroestàtics. Si es disposa de material de laboratori adequat es poden elaborar experiències amb vasos comunicants o pistons per reproduir una premsa hidràulica. També es pot fer servir material quotidià com ampolles, galledes d'aigua, mànegues, tubs, tubs foradats, etc., per plantejar petits reptes, com moure aigua d'un lloc a un altre sense tocar alguns objectes, fent ús de les propietats hidroestàtiques de l'aigua. La manera de plantejar aquestes activitats pot ser molt variada, sigui mitjançant activitats dirigides, mitjançant ludificació, plantejant reptes d'enginyeria, etc. També dependrà de l'època de l'any, i si és convenient assumir el risc que els estudiants es puguin mullar o no. A més de manipular aigua, també és interessant observar vídeos de fenòmens hidroestàtics difícils de reproduir a l'escola, així com simulacions virtuals que enfrontin els estudiants a fenòmens poc intuïtius que hagin d'explicar, com els descrits anteriorment.

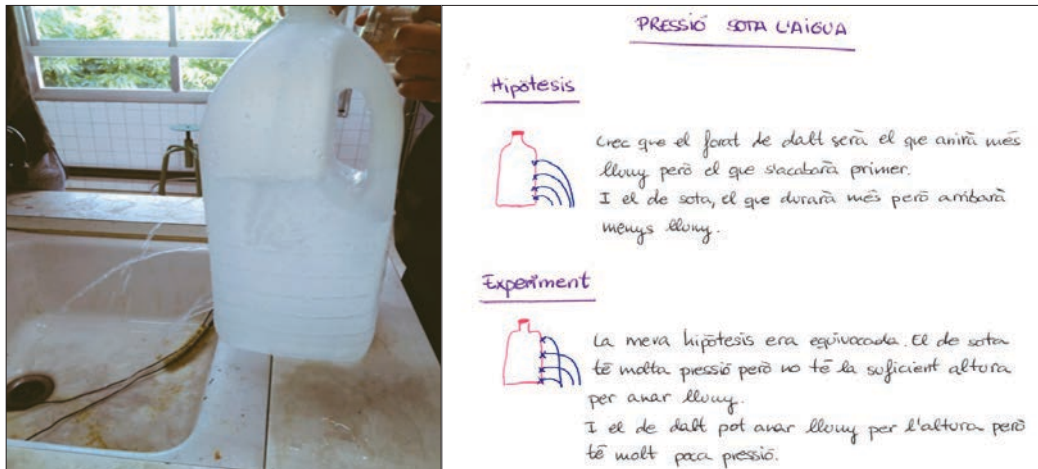


Figura 3.10. Experiment amb una columna d'aigua, en què una estudiant primer fa una predicció, i després la revisa sobre la base dels resultats de l'experiment. Font: elaboració pròpia.

En el cas de les simulacions, a més, es poden plantejar situacions fictícies, com ara modificar el valor de la gravetat i observar l'efecte sobre la pressió de diferents fluids, o eliminar l'atmosfera per observar què passa en absència de pressió atmosfèrica.

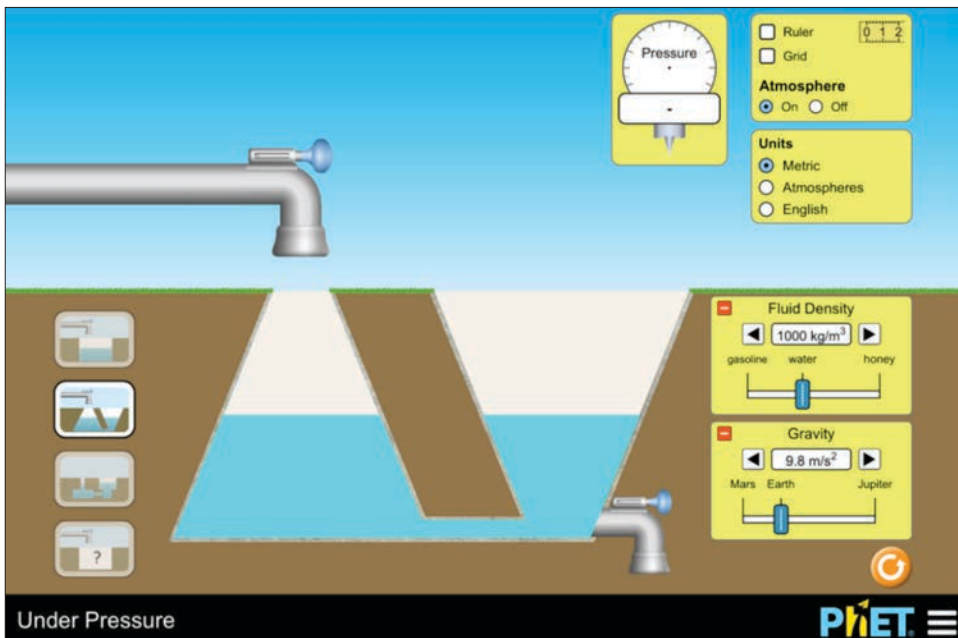


Figura 3.11. Simulació de PhET Colorado, en què l'estudiant pot modificar variables com la forma dels recipients, afegir-hi o treure'n líquid, afegir-hi o treure'n pressió atmosfèrica, etc., i anar mesurant la pressió en cada lloc. Font: PhET Colorado.

Per explicar de manera satisfactòria els resultats obtinguts en els diferents experiments realitzats, en primer lloc podem conceptualitzar l'aigua (o els fluids en general) com un sistema format per diferents parts, com si fossin boles elàstiques i incompressible (com ara boles de billar), apilades en capes l'una sobre l'altra. Però compte, amb aquesta analogia no parlem de les «partícules» a les quals ens referim normalment en el model cinetico-molecular (que són una transposició didàctica del model de física estadística), les quals es

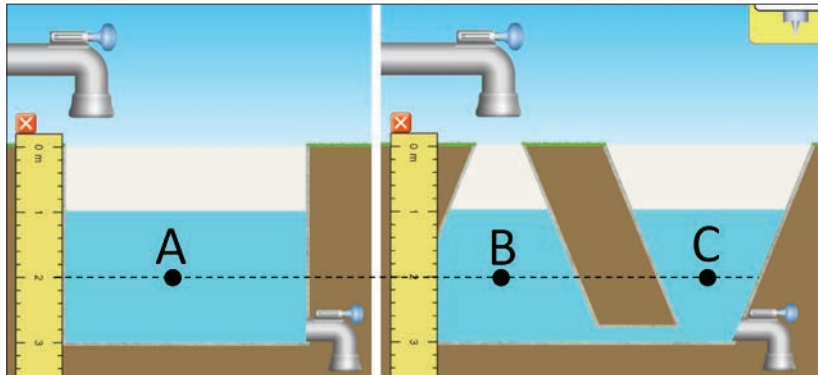
Prova-ho a l'aula

Sota pressió (individual o en grup)

Els bussejadors s'han de preparar per fer immersions submarines, encara que sigui a pocs metres de profunditat, ja que la diferència de pressió pot ser perjudicial per a la salut. En aquest enllaç trobaràs una simulació que permet mesurar la pressió dins de l'aigua:

<https://phet.colorado.edu/en/simulations/under-pressure>

Imagina que realitzaràs tres immersions verticals en els punts A, B i C. En els tres casos la immersió serà d'1, 2 i 3 metres, respectivament.



Fes la teva predicció: com ordenaries el valor que marcarà el manòmetre per a cadascuna de les 9 situacions? A1, A2, A3, B1, B2, B3, C1, C2, C3.

Un cop feta la teva predicció, fes servir el manòmetre virtual i omple la taula.

	Immersion A	Immersion B	Immersion C
1 m profunditat			
2 m profunditat			
3 m profunditat			

1. En què s'assembla la teva predicció als resultats obtinguts?
2. En què es diferencia?
3. A quina conclusió pots arribar?
4. De quins factors depèn la pressió hidrostàtica en cada punt?

.....

.....

.....

.....

Amb aquesta activitat, adaptada de la unitat didàctica «Immersion» del grup DIATIC, l'alumnat pot experimentar la pressió hidrostàtica mitjançant una simulació. La predicció inicial l'obliga a pensar si creu que l'increment de pressió és el mateix en les tres immersions o no. Posteriorment, pot arrossegar el manòmetre digital que apareix en la simulació a cadascuna de les coordenades, i completar la taula.

mouen de manera aleatòria en funció de la temperatura i l'estat d'agregació, i en què la pressió es conceptualitza com la intensitat mitjana de les col·lisions entre les partícules i amb les parets del recipient que el conté. En canvi, en el model que s'ha proposat en didàctica de la física per explicar la pressió, ens referim a boles com una entitat a escala mesoscòpica, com si es tractés de petites bales de juguina, que són estàtiques i cada vegada que una bola rep una força en una direcció, en comptes de deformar-se, la distribueix uniformement en totes les direccions alhora. Així, segons aquesta analogia, dins de cada capa horitzontal de boles, les forces es reparteixen entre elles, com també sobre les parets que les envolten i sobre els objectes submergits. Les forces verticals, en canvi, no són iguals, ja que cada bola ha de suportar la que té la bola a la capa de sobre. Això fa que cada capa rebi/faci més força cap avall que cap amunt, de manera que les forces verticals es van intensificant a mesura que ens situem en capes més inferiors. Així, si les forces es reparteixen en totes les direccions però cada capa aguanta més pes que l'anterior, podem dir que les capes inferiors també reben/fan més força contra les parets del recipient, i sobre qualsevol objecte que s'hi trobi submergit.

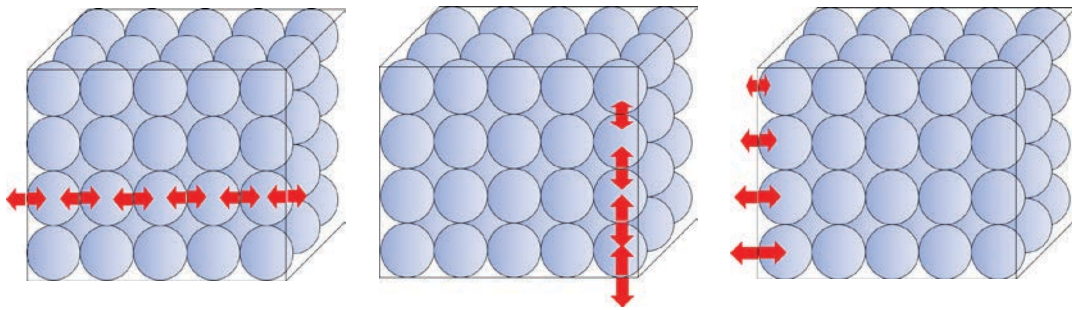


Figura 3.12. Diagrames que expliquen la pressió hidrostàtica fent servir un model de boles incompressibles que distribueixen les forces en totes direccions. Adaptat de Besson i Viennot (2004).

Podem ajudar a construir aquest model amb l'analogia d'un munt de persones que es troben en un espai tancat totalment comprimides, suposant que aquestes persones fossin totalment rígides i incompressibles. Si, des d'algun dels extrems, altres persones empenyen encara més el grup, les persones del medi experimentaràn com la pressió augmenta en totes les direccions del seu cos i no només en la direcció de l'empenta, fins al punt que les persones del medi ni tan sols saben des d'on s'està empenyent. Això és, de fet, el que passa amb els lamentables episodis d'allaus humanes, que han ocasionat morts per asfíxia en molts llocs del món. A més, aquesta mateixa analogia permet explicar l'increment de la pressió verticalment, ja que, si pensem a apilar «capes de persones» l'una damunt l'altra, és fàcil imaginar que les que es troben per sota estan sotmeses a més pressió que les de sobre, tal com passa en un castell humà, en què les persones de la pinya reben més pressió que les dels pisos superiors.



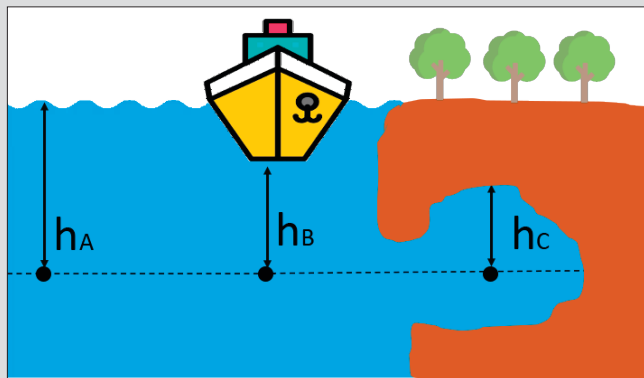
Figura 3.13. Analogia de la distribució de les forces en totes direccions en una allau humana. Font: elaboració pròpia.

El racó de pensar

La pressió no sempre depèn del pes de la columna d'aigua que queda per sobre de l'objecte submergit!

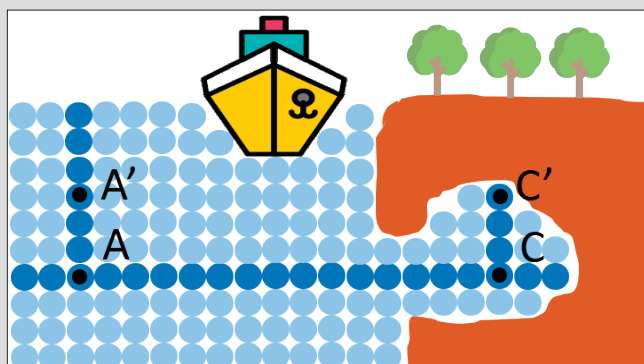
Una de les maneres recurrents d'explicar la pressió hidrostàtica que experimenta un objecte submergit és a partir de la columna d'aigua que queda per sobre de l'objecte. És a dir, un objecte submergit a 10 metres experimentaria una pressió igual a $P = \rho \cdot g \cdot h$, en què ρ és la densitat del fluid (normalment aigua), g la gravetat i h l'altura de la columna del fluid.

Ara bé, suposem que l'objecte no es troba sota una columna d'aigua que arriba fins a la superfície (com passa en el cas A), sinó que aquesta columna és menor perquè hi ha algun objecte entre el punt i la superfície (com passa en els casos B i C). Podem dir que la pressió del punt A és més gran que les dels punts B i C pel fet que la columna d'aigua que té a sobre és més gran?



Evidentment, la resposta és que no, ja que, si els punts A, B i C són a la mateixa altura, estan també a la mateixa pressió, malgrat no situar-se sota una columna d'aigua de la mateixa altura. De fet, fent una reducció a l'absurd, si el punt B o C tinguessin menys pressió que A, tindríem una corrent d'aigua del punt de més pressió al de menys pressió, fins que aquestes s'igualesin.

Si tornem al model de boles rígides i incompressibles proposat per Besson i Viennot (2004), podem pensar el següent: la bola situada al punt A ha d'aguantar totes les boles situades a seu damunt, però, alhora, reparteix aquesta força en totes direccions, també horitzontalment. A la seva vegada, totes les boles que es troben a la capa horitzontal entre A i C experimenten forces entre elles de la mateixa intensitat, i la bola al punt C alhora rep/fa forces sobre les boles que es troben a sobre seu. Per tant, la bola que es troba a C' empeny el sostre de la cova amb una força igual que la que la bola A' rep/fa sobre les boles que té al seu damunt.



Aquest model ens permet anar un pas més enllà de la pressió com el pes de la columna d'aigua sobre un objecte submergit, ja que, si imaginem l'aigua com aquest conjunt de boles, aquestes fan/reben força no només contra les parets horitzontals del recipient que les conté, sinó també sobre les parets verticals.

3.2.3. A quina versió de la idea de pressió dels fluids volem arribar i per a què?

El model de fluid format per capes que se suporten entre elles i que reparteixen les forces que reben homogeniament en totes direccions permet concebre la pressió hidrostàtica com una magnitud intensiva (no depèn del volum de fluid que hi ha a sobre), que només depèn de la profunditat del fluid respecte de la seva superfície, i no de la seva forma (paradoxa hidrostàtica). Aquest model serveix tant per explicar el comportament de l'aigua com el de l'aire atmosfèric, i també situacions en què cal tenir en compte la interacció dels dos fluids, ja que aquests s'exerceixen la pressió corresponent a la superfície de contacte. Si l'aigua (o un altre líquid) ocupa diversos vasos comunicants i la pressió a les superfícies de contacte és la mateixa, l'alçada dels fluids també serà la mateixa. Si alguna de les pressions exteriors és diferent, l'alçada de l'aigua en els fluids variarà per mantenir l'equilibri de pressions al seu interior, tal com passa amb l'absorció en una palleta, en el conegut baròmetre de mercuri de Torricelli o en les premses i els frens hidràulics.

Aquesta aproximació al model hidroestàtic no inclou explicacions més complexes, com ara què passa a la superfície de contacte entre diferents fluids (la tensió superficial), la viscositat o les turbulències en un fluid dinàmic, però pot ser de gran utilitat per a moltes situacions quotidianes, com molts fenòmens atmosfèrics, l'absorció de fluids en aspiradores o màquines de fer el buit, els frens hidràulics de la bicicleta, les tècniques de separació de fluids per decantació, etc. Per a aquells estudiants que prossegueixin l'escolaritat, aquesta versió del model haurà de ser ampliada amb el model de continuïtat hidrodinàmica, per explicar fenòmens relacionats amb el principi de Bernoulli.

3.3. La idea de flotació com a equilibri entre el pes i l'empenta

Abans de començar... Posa a prova les teves idees

Diu un conte popular que hi havia un ermità que vivia amb el seu elefant. Havien de travessar un llac molt profund, i l'ermità va fer servir uns troncs de fusta per fer una embarcació en forma de rai. Primer va construir una embarcació plana, però, en pujar-hi l'elefant a sobre, aquesta es va enfonsar. Després se li va ocórrer afegir a l'embarcació unes tanques laterals, amb la qual cosa va convertir l'embarcació plana en una de còncava. Sorprenentment aquesta vegada l'embarcació va surar amb l'elefant a dins, i van poder travessar tranquil·lament el llac fins a l'altra riba. Com és possible?



Llegiu-ho després d'haver respost individualment

Les explicacions que acostuma a donar l'alumnat a aquesta pregunta són molt variades. De vegades són del tipus «gràcies a les tanques laterals l'aigua no entra a l'embarcació, i per tant l'aigua no empeny cap avall i ja no s'enfonsa». També hi ha altres explicacions de l'estil «en posar les tanques, la superfície de contacte amb l'aigua és més gran, i així l'aigua pot empenyer amb més força l'embarcació».

La resposta que hauríem d'esperar d'un estudiant que domini el model de flotació implica pensar que, gràcies a les tanques laterals afegides, el volum total d'aigua que pot desplaçar l'embarcació és molt més gran, cosa que provoca una major empenta. En entrar a l'aigua, la barca començarà a enfonsar-se, fins que el volum d'aigua desplaçada impliqui una empenta igual que el pes, i per tant, pugui flotar.

3.3.1. El punt de partida de l'alumnat sobre flotació

La flotació —com a contingut escolar— se situa en molts currículums en l'etapa d'educació primària, període en què s'acostuma a plantejar a l'alumnat fenòmens i interaccions físiques més simples i quotidianes. No obstant això, la recerca en didàctica de la física ens mostra que, en arribar a la secundària, les explicacions alternatives sobre flotació en molts casos no s'han superat. A continuació, presentem algunes de les més comunes.

a. La flotació com a propietat intrínseca d'alguns materials

Igual com presentem en les idees alternatives sobre pes (apartat 3.1.1.), és comú trobar explicacions en què el fet de flotar és una propietat d'alguns materials, mentre que d'altres tenen la propietat d'enfonsar-se: «les coses fetes de fusta floten, perquè la fusta sempre flota». Aquesta explicació no és estrictament errònia, i de fet en els primers cursos de l'educació secundària és comú trobar explicacions docents basades en la densitat

dels materials (els materials més densos que l'aigua, de més d'1 g/ml, s'enfonsen, i els de menor densitat floten). Aquesta resposta en termes de densitat ens proporciona un model descriptiu, però no una explicació interpretativa del fenomen. És a dir, no responem a la pregunta «i per què els objectes amb menor densitat que l'aigua floten, mentre els que tenen més densitat s'enfonsen?». A més, en ser la flotació un cas més de canvi en l'estat de moviment d'un objecte, és erroni centrar l'explicació en una propietat de l'objecte, i no en una interacció entre objectes (en aquest cas, objecte i aigua o qualsevol altre fluid).

El problema és que, en pensar en termes de propietats, molts estudiants poden acabar plantejant l'explicació en termes dicotòmics: l'aigua només empeny cap amunt aquells objectes lleugers o que floten, però no els pesants o que s'enfonsen. Fins i tot podem trobar explicacions en què l'aigua empeny cap amunt els objectes que floten, i empeny cap avall els que s'enfonsen. A més, en moltes explicacions alternatives el pes també canvia segons el tipus de materials: els objectes que s'enfonsen sí que reben la força gravitatòria, però els que floten no, ja que dins de l'aigua «no pesen».

b. La flotació depèn de la superfície o de la mida de l'objecte

Si bé és cert que la densitat dels materials intervé en la seva flotació, hi ha moltes situacions en què objectes fets de materials molt densos poden flotar, com per exemple els vaixells fets de metall. En preguntar per aquesta qüestió a l'alumnat pot aparèixer la idea que els vaixells, a causa de la seva forma, reben una empenta suficient de l'aigua, però, en comptes de plantejar-ho en termes de volum d'aigua desplaçada, ho plantegen en termes de superfície de contacte, com s'esdevé amb el fregament. Així, una persona amb els braços i les cames estirades pot flotar més que una que els tingui recollits, ja que l'aigua l'empeny «millor».

També és comuna una altra idea estretament relacionada: la flotació depèn de la mida dels objectes. Tot i que aquesta idea apareix sobretot en l'educació primària, encara en els primers cursos de la secundària es pot sentir alguns estudiants que afirmen que alguna cosa s'enfonsa perquè és molt gran, o bé que les coses petites floten pel fet de ser petites, tal com ironitzaven els cavallers de la Taula Quadrada a *Monty Python and the Holy Grail* quan afirmaven que les pedres floten si són petites.

c. Confusió entre la força d'Arquimedes i la tercera llei de Newton

Un cop s'ha introduït la idea d'empenta o força d'Arquimedes (és a dir, la força que fa l'aigua o el fluid sobre un objecte que s'hi enfonsa, el valor de la qual equival al pes del volum d'aigua desplaçada per l'objecte), pot aparèixer la confusió amb la força d'interacció de l'objecte i l'aigua. Això s'esdevé especialment quan es fan servir representacions vectorials de les forces, ja que el vector pes (que actua sobre l'objecte) i el vector de la força que fa l'objecte sobre l'aigua (que actua sobre l'aigua) es representen de la mateixa manera. En preguntar per què un vaixell pot flotar, una explicació que hi podem trobar és del tipus: «el vaixell fa molta força sobre l'aigua, i l'aigua li respon amb la mateixa força; per això flota». Evidentment, les forces que es fan mútuament el cos i l'aigua són del mateix valor (tercera llei de Newton), però és independent de si el valor pes és igual que l'empenta (quan flota) o més gran que l'empenta (quan s'enfonsa).

3.3.2. Com ajudem a construir la idea de flotació?

Per orientar l'estudiant a concebre la flotació com una interacció amb l'aigua (o el fluid que sigui), convé que analitzi què sent un objecte quan entra a l'aigua. Això implica que experimenti quant costa «fer un forat a l'aigua», notant la resistència que fa l'aigua contra l'objecte que la penetra. Aquesta resistència o empenta que ens fa l'aigua és una força que empeny els objectes submergits cap amunt. Podem experimentar-la, per exemple, en intentar enfonsar un got de plàstic o una pilota de platja a l'aigua. I podem veure que, com més gran és el forat que fem a l'aigua (com més submergim un objecte o com més volum té l'objecte submergit), més empenta notem.

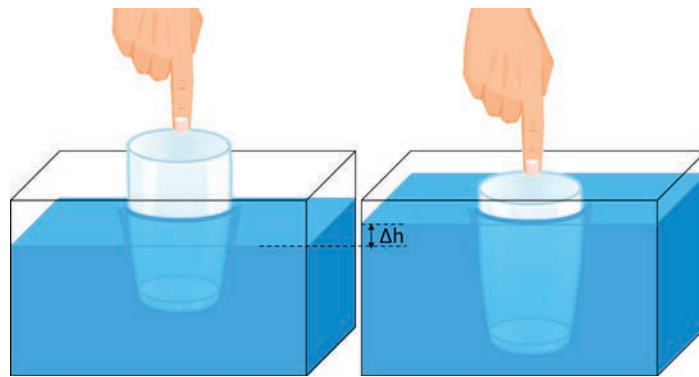


Figura 3.14. La simple experiència sensitiva de percebre que costa més enfonsar el got més avall pot ajudar l'alumnat a relacionar l'empenta amb el volum d'aigua desplaçada. A més, si el recipient no és gaire gran, l'alumnat pot veure que, a mesura que el got s'enfonsa més, l'aigua del voltant puja de nivell. Elaboració pròpia.

Aquesta empenta que noten els cossos en penetrar a l'aigua és una força clarament cap amunt. Però, si hi ha aigua per tot arreu, com és que l'aigua empeny l'objecte cap amunt i no, per exemple, cap a un costat? La resposta la trobarem si recuperem la idea de l'apartat anterior que, a mesura que augmenta la profunditat, la pressió es fa més intensa. A partir d'aquesta idea, podem usar diagrames com el de la figura 3.15, que ajudaran el nostre alumnat a pensar que l'aigua en realitat empeny els cossos que hi entren per totes bandes, però que ho fa amb més intensitat per la part inferior, per tal com l'empenta és la força resultant de totes les «microforces» que rep el cos.

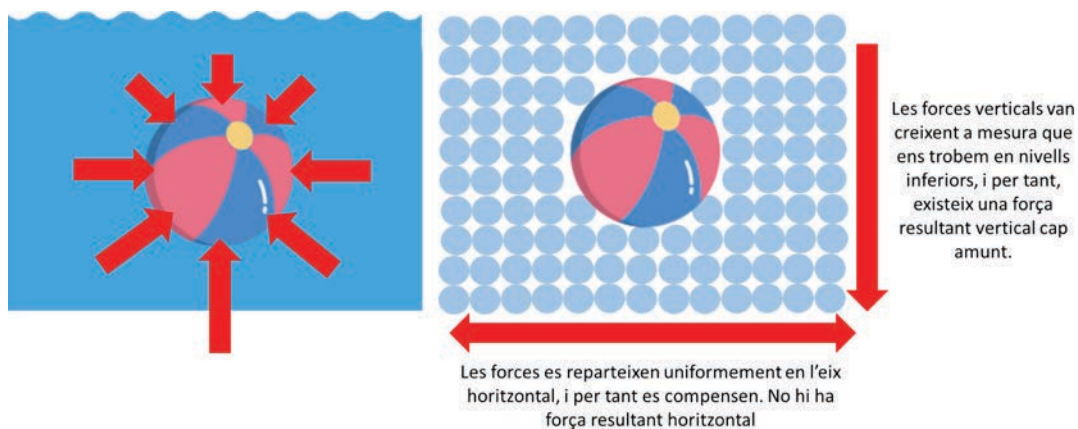


Figura 3.15. Explicació basada en forces de per què l'empenta és cap amunt malgrat que realment un fluid fa força alhora en totes direccions. Elaboració pròpia.

També convé fer experiments per veure què passa amb l'aigua quan hi entrem, reproduint la icònica situació d'Arquimedes en entrar a la banyera plena d'aigua i cridant «eureka!». Per exemple, podem mesurar el volum d'aigua desplaçat per objectes de geometria regular (amb un volum fàcil de calcular) en diferents nivells d'immersió. Això ens permet observar i mesurar que l'objecte submergit desplaça una quantitat d'aigua que correspon exactament amb el seu volum, i que això té molt de sentit: un objecte «fa un forat» a l'aigua com a màxim igual al volum que ocupa, i aquesta aigua que ja no és on era (la del forat) es desplaça apujant el nivell d'aigua al voltant de l'objecte. En aquest tipus d'experiments és important destacar que el volum desplaçat és independent del pes de l'objecte, per així evitar la confusió que hem esmentat anteriorment entre l'empenta i el pes. És a dir, convé fer el mateix experiment amb dos objectes de geometria idèntica i diferents materials, com ara un cilindre de plom i un d'alumini, per exemple.

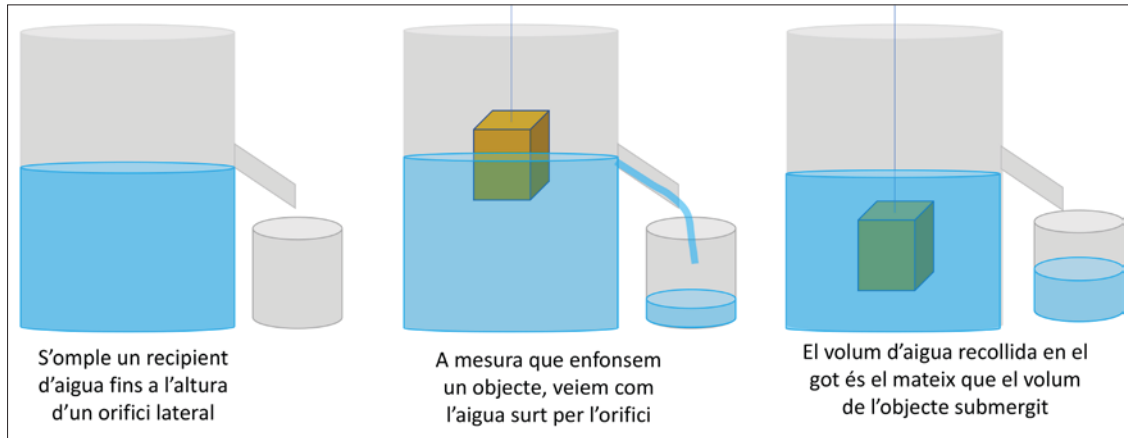


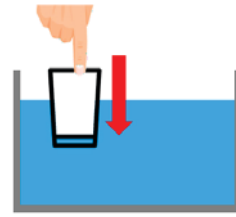
Figura 3.16. Experiment que ajuda a percebre el volum d'aigua desplaçada. Elaboració pròpia.

Una vegada hem vist que tot cos en enfonsar-se en un fluid rep una empenta d'aquest fluid (el fluid es resisteix que hi entri el cos); que aquesta empenta és vertical i més gran com més s'enfonsa en el fluid (com més hi entra el cos, més empenta rep), i que alhora es desplaça un volum equivalent de fluid (com més s'enfonsa el cos, més volum de fluid desplaça), ens serà fàcil relacionar el valor de l'empenta amb el valor del pes d'aquesta aigua desplaçada. Per exemple, podem veure que per submergir un got de plàstic (amb un pes negligible) fins a la vora però sense que s'ompli d'aigua ens cal fer una certa força, que podem mesurar amb un dinamòmetre. Aquesta força que mesura el dinamòmetre, que és la que fem per mantenir el got enfonsat fins a la vora, serà equivalent a l'empenta perquè són forces d'acció-reacció. Però, si omplim aquest got d'aigua fins a la vora i el fem a l'aigua, llavors ja no hem de fer cap força perquè suri igual que abans. Això ens indica que el pes de l'aigua que hem ficat dins del got compensa l'empenta que fa l'aigua del recipient al got submergit fins a la vora. I, de fet, si mesurem el pes del got ple d'aigua amb el mateix dinamòmetre, ens donarà el mateix valor que el de la força d'empenta mesurada abans. És a dir, que el valor de l'empenta sobre un cos submergit en un fluid és exactament el valor del volum del cos ple d'aigua. I el mateix passaria si ho provem submergint només una part del cos (per exemple, fent el mateix fins a mig got).

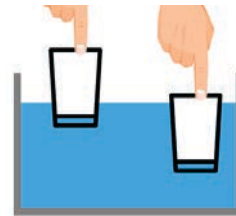
Prova-ho a l'aula

Quant costa enfonsar un got d'aigua? (individual o en grup)

1. Col·loca un got buit (només amb aire dins) sobre un recipient ple d'aigua, i tracta d'enfonsar el got, com si volguéssim fer un «forat a l'aigua». Explica amb les teves paraules què passa.



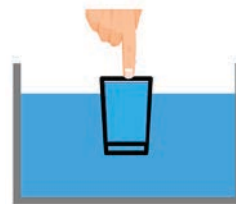
2. Prova d'enfonsar només la part inferior del got, i després intenta enfonsar-lo fins que el got quedi pràcticament a dins, però evitant que l'aigua entri a l'interior. Quines diferències observes entre ambdues situacions?



3. Repeteix aquestes experiències amb el got ple d'aigua fins a la meitat. Quines diferències observes respecte als casos anteriors?



4. Repeteix per tercera vegada l'experiència, però aquesta vegada amb el got totalment ple d'aigua. Observa què passa, i després retira el got ple d'aigua i mesura'n la massa (got + aigua) en una bàscula.



5. Torna a col·locar el got buit sobre l'aigua, i ves omplint-lo amb cullerades de sorra. El got s'anirà enfonsant. Deixa d'afegir sorra just abans que el got quedi completament enfonsat. Retira el got i mesura'n la massa amb una bàscula. Després repeteix el procés amb monedes o amb cargols molt petits, omplint el got fins que quedi al límit de l'enfonsament, i després retira'l per mesurar-ne la massa. Quins resultats hi observes?



A través de la percepció de la força que l'estudiant ha de fer sobre el got per enfonsar-lo es pretén orientar la mirada de la flotació com una interacció objecte-aigua. A major enfonsament, la força que cal fer és més gran, ja que el desplaçament d'aigua que es produeix és també més gran. No obstant això, quan el got està parcialment ple d'aigua la força per enfonsar-lo és menor; i quan està completament ple d'aigua, ni tan sols cal empènyer-lo, ja que se situa a la vora de l'esfondrament: el pes del got (amb aigua a dins) és el mateix que el pes de l'aigua que ha desplaçat. Quan aquesta experiència es repeteix amb altres objectes de més densitat, no cal omplir el got completament perquè aquest s'enfonsi, ja que amb menys volum s'obté el mateix pes.

3.3.3. A quina versió de la idea de flotació volem arribar i per a què?

A través de discussions, experiments, simulacions i altres activitats, l'alumnat hauria de ser capaç d'explicar la flotació com el resultat de la força d'empenta que exerceix l'aigua (o un altre fluid) sobre els objectes (majoritàriament sòlids) que es troben a dins seu. Aquesta força d'empenta equival al pes d'aigua desplaçada per l'objecte, i actua sempre, independentment del pes de l'objecte, de la composició o la forma. Només depèn del volum submergit, i sempre és cap amunt, ja que és el resultat de totes les forces que exerceixen les «parts» de l'aigua en totes direccions, però amb més intensitat des de la part inferior. Aquesta força pot ser menor, igual o major que el pes de l'objecte:

- Si $F_{\text{empenta}} < P$, la força de l'aigua no evitarà l'enfonsament, però suavitzarà la caiguda.
- Si $F_{\text{empenta}} = P$, el cos es mantindrà en suspensió a l'aigua, sense arribar a recolzar-se en el fons del recipient.
- Si $F_{\text{empenta}} > P$ (per exemple, si forcem un objecte flotant a enfonsar-se), l'aigua simplement expulsaria part del cos, es reduiria el volum d'aigua desplaçat i ambdues forces tornarien a igualar-se i es quedaria flotant més amunt.*

*A nivell de física avançada, parlariem d'una oscil·lació esmorteïda.

Amb aquestes regles de joc, es poden explicar fàcilment els exemples més comuns de flotació, com l'enfonsament dels vaixells, el paper de la bufeta natatòria dels peixos o una cosa tan simple com per què una taronja sencera flota, però una taronja pelada s'enfonsa. Per reconciliar aquesta explicació interpretativa utilitzant el model de forces amb l'explicació descriptiva que és comuna als estudiants (que els objectes amb menys densitat que l'aigua suren en aigua), podem veure que l'empenta que fa l'aigua està limitada, com a màxim, per un objecte donat, que pot ser equivalent al pes del volum total de l'objecte com si estigués fet d'aigua (és a dir, com a màxim l'aigua pot sostenir un objecte de qualsevol forma fet d'aigua). Si l'objecte està fet d'alguna cosa molt més lleugera (molt menys densa) que l'aigua, com ara un flotador, l'objecte sura, perquè l'empenta màxima que rep si l'enfonsem sencer és molt més gran del que pesa tot l'objecte. Quan sura, el volum petitíssim de l'objecte que està submergit (la part del flotador dins de l'aigua) ens assenyalava la quantitat d'aigua que pesa el mateix que tot l'objecte. Així, objectes amb densitat molt propera a la de l'aigua suren amb una part molt petita a fora de l'aigua, mentre que objectes amb densitats molt més petites que la del líquid on estiguin surant poden tenir una part molt important de l'objecte fora de l'aigua.

Amb un objecte pesant o de densitat més gran que l'aigua, però, com que l'empenta màxima que li fa l'aigua (el pes de tot l'objecte com si estigués fet d'aigua) mai no pot compensar el que pesa realment l'objecte (perquè el seu volum està fet d'una cosa que és més densa que l'aigua), s'enfonsa.

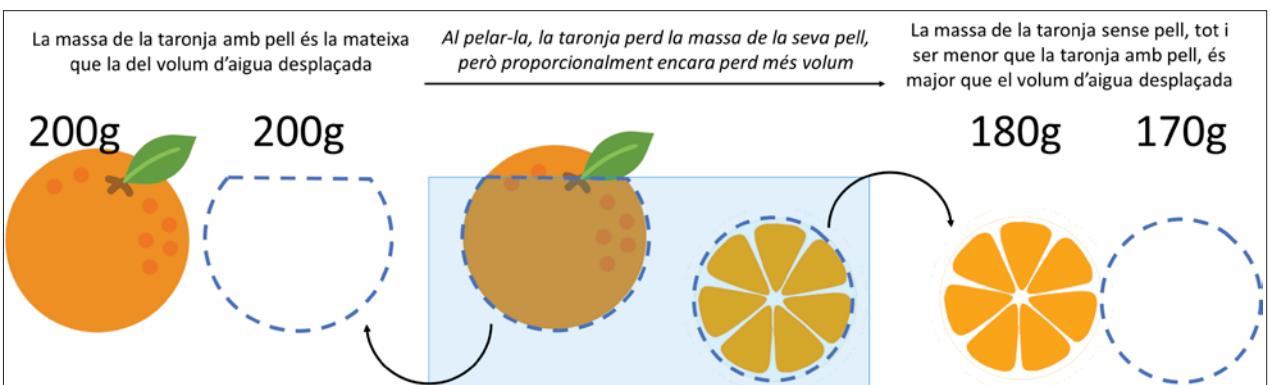


Figura 3.17. Exemples de fenòmens que es poden explicar amb el model de flotació.

A més, amb aquest model, s'ampliarà el rang de fenòmens canviant l'aigua per un altre fluid. Es pot plantejar, per exemple, per què flotem millor al mar que a la piscina? Com que l'aigua del mar és una mica més densa que la de la piscina, l'empenta que rep el mateix objecte és més gran (ja que el pes del volum d'aigua desplaçada també és més gran). També podem extrapolar la idea de flotació a l'aire atmosfèric, plantejant-nos una explicació a la flotació dels globus d'heli.

ENSENYAR PRESSIÓ ATMOSFÈRICA I GRAVITACIÓ A TRAVÉS D'ABP

El projecte CanSat de l'Agència Espacial Europea

El projecte CanSat de l'Agència Espacial Europea (ESA) és una iniciativa que permet als estudiants de tot el món dissenyar, construir i llançar satèl·lits en miniatura. Aquest projecte es divideix en tres fases: disseny, construcció i llançament. En la fase de disseny, els alumnes han de crear un pla per al seu satèl·lit, definint-ne les funcions i característiques. A la fase de construcció, els alumnes han de fabricar el seu propi satèl·lit, posant en pràctica els coneixements en electrònica, programació i disseny mecànic. Finalment, a la fase de llançament, els alumnes han de llançar el satèl·lit i anotar les dades que aquest reculli durant el vol.



En relació amb la pressió atmosfèrica, els estudiants aprenen a mesurar-la i a entendre'n la importància per a la vida a la Terra. Els satèl·lits CanSat estan equipats amb sensors que permeten als alumnes mesurar la pressió atmosfèrica a diferents altituds, la qual cosa els ajuda a entendre com varia la pressió a mesura que s'ascendeix a l'atmosfera terrestre. Això també els permet aprendre sobre la importància de la pressió atmosfèrica per a la vida humana i com afecta el clima.

Pel que fa a la gravitació, els estudiants aprenen, a través del projecte CanSat, com els satèl·lits es mouen a l'òrbita de la Terra i com la gravetat n'afecta el moviment. A través de la construcció i el llançament dels seus propis satèl·lits, els estudiants poden comprendre com les lleis de la física s'apliquen en l'espai i com afecten el moviment dels objectes. Això també els ajuda a entendre els desafiaments tècnics que els científics i els enginyers han de superar per aconseguir posar satèl·lits en òrbita al voltant de la Terra.

Per saber-ne més: ESERO (European Space Education Resource Office).

Bibliografia clàssica de referència sobre gravitació i fluids

- BESSON, U.; VIENNOT, L. (2004). Using models at the mesoscopic scale in teaching physics: Two experimental interventions in solid friction and fluid statics. *International Journal of Science Education*, 26 (9), 1083-1110.
- CARRASCOSA, J. (1992). Concepciones alternativas en mecánica. *Enseñanza de las ciencias*, 10 (3).
- ENGEL CLOUGH, E.; DRIVER, R. (1985). What do children understand about pressure in fluids? *Research in Science and Technological Education*, 3, 133-144.
- KARIOTOGLOU, P.; PSILLOS, D. (1993). Pupils' pressure models and their implications for instruction. *Research in Science and Technological Education*, 11 (1), 95-108.
- WHITE, R. (1981). Understanding of Gravity. *Science Education*, 65, 291-299.

Capítol 4. Ensenyar electricitat i magnetisme a secundària

En l'ensenyament de la física universitària, estaríem d'acord que tots els fenòmens de tipus elèctric i/o magnètic al nostre voltant s'expliquen amb una única teoria, l'electromagnetisme. La fita aconseguida al segle XIX d'unificar l'electrostàtica, l'electrodinàmica, el magnetisme i la radiació electromagnètica va ser majúscula, i les equacions de Maxwell que descriuen tal relació són un autèntic símbol d'aquest esperit «unificador» tan propi de la física.

No obstant això, en l'educació secundària obligatòria no té sentit presentar l'electromagnetisme com una única gran teoria (és a dir, un únic model), ja que el grau d'abstracció i complexitat matemàtica per unificar completament electricitat i magnetisme és molt elevat. En el capítol 1 ja hem proposat parlar més aviat d'una família de models sobre electricitat i magnetisme, de manera que l'alumnat aprengui a construir explicacions particulars per a cada tipus de fenomen. Això no treu que l'estudiant hagi de conèixer l'existència de l'equivalència entre electricitat i magnetisme que permet explicar els generadors o motors elèctrics, però abordant-la des d'una aproximació eminentment qualitativa.

A grans trets, creiem que les idees clau per orientar la construcció d'aquests models podrien ser:

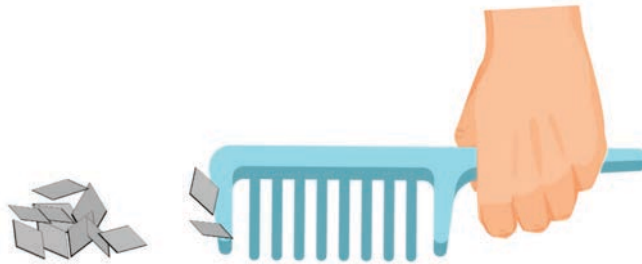
1. La idea d'interacció elèctrica com a resultat de la distribució de càrregues dels materials.
2. La idea d'intensitat elèctrica en un circuit.
3. La idea d'imant i d'inducció electromagnètica.

Per a cadascuna d'aquestes idees, partirem del punt de partida que acostumem a trobar a les aules (idees i raonaments alternatius), i posteriorment discutim algunes estratègies concretes i activitats d'aula que poden ser de més utilitat, per així acabar definint quina versió de cada idea clau esperem que hagin construït al final de la seva escolaritat.

4.1. La idea d'interacció elèctrica com a resultat de la distribució de càrregues dels materials

Abans de començar... Posa a prova les teves idees

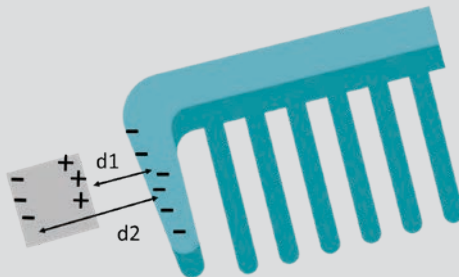
Segurament en algun moment de la vida has vist o realitzat el joc d'atraure petits trossos de paper després de fregar un pinta, un bolígraf o alguna altra peça de plàstic amb els cabells o amb una tela. Però series capaç d'explicar per què passa, tenint en compte que el paper teòricament és elèctricament neutre?



Llegiu-ho després d'haver respost individualment

Si fas la prova amb estudiants, de vegades apareix la idea que es creen càrregues amb el fregament, i altres vegades la idea que les càrregues que hi havia a la tela o els cabells passen a la pinta, que passa a estar carregada. No obstant això, com pot ser que la pinta carregada atregui els papers, si aquests en teoria són elèctricament neutres?

La resposta formal és una mica més complexa, ja que requereix dos raonaments simultanis. Suposem que la pinta es carrega negativament, ja que amb el fregament alguns electrons dels cabells es transfereixen a la pinta. Tot i no ser un conductor, els electrons en el paper tenen un cert marge de moviment, cosa que en provoca el lleuger desplaçament. En ser repel·lits per les càrregues de la pinta, tendiran a allunyar-se, i deixaran les zones del paper més properes a la pinta amb una càrrega neta positiva (ja que els electrons s'estan allunyant d'aquesta zona). Aquest fenomen s'anomena polarització, i s'esdevé només en els materials dielèctrics, és a dir, que permeten un cert moviment de les càrregues, però no la lliure circulació com en els conductors. Podem imaginar el paper polaritzat com un objecte elèctricament neutre, però a l'interior del qual hi ha una zona amb més càrregues positives + i una altra amb més càrregues negatives -. Per tant, el paper no rebrà una força elèctrica, sinó dues: una d'atracció, que actuarà sobre la zona del paper amb càrregues positives, i una de repulsió, que actuarà sobre la zona amb càrregues negatives. Però ambdues forces no es compensen totalment, ja que, com que la distància a la pinta és diferent ($d1 < d2$), la força d'atracció serà més gran que la de repulsió. I d'aquí l'existència d'una força resultant que, en cas de superar la del pes, provocarà l'elevació dels paperets per uns instants. En entrar en contacte, als pocs segons es produeix una reordenació de càrregues, i en desaparèixer aquestes forces, el paper caurà de nou a terra.



4.1.1. El punt de partida de l'alumnat sobre la idea de càrrega

Les càrregues elèctriques com a tal no les podem veure, però sí els seus efectes sobre el comportament dels cossos. Com s'expliquen, doncs, els fenòmens electroestàtics més comuns com els llamps, les enrampades que experimentem en tocar un metall un dia d'ambient sec, o els cabells de punta dels infants quan baixen per un tobogan de plàstic? A continuació, resumim alguns dels punts de partida més comuns d'acord amb la literatura especialitzada.

a. La dificultat de raonar sobre la base de la conservació de les càrregues

Algunes de les explicacions de l'alumnat que apareixen en la literatura quan se'ls pregunta pel fregament entre el pinta i els cabells, o pels llamps, parteixen de raonaments del tipus «es creen càrregues», o «es generen càrregues». En primer lloc, cal tenir en compte que darrere d'aquestes expressions tampoc no hi ha una idea formal de càrregues, sinó que es fa servir una idea intuïtiva en què càrrega, electricitat i energia sovint són una mateixa cosa. Si no hi ha una idea clara de càrrega, és normal, doncs, que s'utilitzin expressions anàlogues a «es genera electricitat», ja que l'electricitat (com a moviment de càrregues) sí que es pot generar i no en requereix la conservació. Pensar en les càrregues com una cosa que apareix i desapareix dificultarà construir explicacions coherents sobre circuits elèctrics, com veurem a l'apartat 4.2.1.

b. La dificultat per connectar l'electrostàtica amb el model atòmic

Molts materials educatius sobre electrostàtica mostren càrregues positives i negatives dins d'un material continu, com si aquestes tinguessin una entitat material diferent de la resta de la matèria composta per àtoms i alhora partícules subatòmiques carregades. De fet, aquest tipus de representació és el que fem servir al llarg del capítol, ja que fer-ho permet agilitzar molt les explicacions i fa possible representar de manera simple en quines regions d'un material hi ha excés de càrregues positives (menys electrons que protons) i excés de càrregues negatives (més electrons que protons), tal com hem fet en l'exemple dels paperets. Quan no es dibuixen càrregues, s'assumeix que l'objecte està elèctricament neutre. Si cada vegada que haguéssim d'explicar un fenomen electrostàtic s'haguessin de representar totes les càrregues i no només l'excés o falta d'electrons de cada regió, seria molt més tediós i inoperatiu. Ara bé, en fer-ho, hem de ser conscients que això pot induir a idees errònies, com ara que els cossos neutres no tenen càrregues i que els electrons en els objectes sempre són lliures, o bé a no entendre que les càrregues positives que representem no són més que àtoms en què manquen electrons.

c. La idea que l'atracció / repulsió és una propietat dels cossos carregats, no una interacció

Igual com en el capítol 2 vam discutir la idea alternativa de força com a propietat, i en el capítol 3 passava el mateix concretament per a la força pes, sovint es concep l'atracció i repulsió com una propietat dels cossos carregats (i com veurem en el subapartat 4.3.1, també dels imants). Si tornem a l'exemple de la pinta amb què obríem la secció, veiem que era comú pensar que la pinta atrau els paperets *per se*, sense necessitat de pensar què ha de passar en els paperets perquè aquests siguin atrets o repel·lits. En molts casos també es fa l'associació «càrrega positiva = atracció», i «càrrega negativa = repulsió», sense tenir en compte que l'atracció / repulsió depèn del signe de la càrrega no només en un dels objectes sinó dels dos objectes que interaccionen. Fins i tot de vegades es confon «l'atracció» amb «l'absorció».

Aquest pensament d'atracció / repulsió com a propietat i no com a interacció és molt comú en les pel·lícules de ciència-ficció, en què personatges amb poders sobrenaturals són capaços d'atreure objectes a distància. També és una idea força recurrent en les pseudociències i el pensament místic i esotèric, i de fet s'ha identificat una influència en alguns estudiants a l'hora de fer servir el concepte «positiu / negatiu» associat a les càrregues, ja que semblaria que les càrregues positives tenen un valor positiu a escala social, emocional o espiritual. De nou, la confusió entre càrregues / energia no ajuda, tal com parlarem al capítol 6.

4.1.2. Com ajudem a construir la idea de càrrega i interacció elèctrica?

Un dels problemes d'ensenyar electrostàtica és que requereix involucrar l'alumnat de manera simultània en el que passa a escala macroscòpica (el que veiem) i el que s'esdevé a escala submicroscòpica (el que ens imaginem). Per això, convé proposar petits experiments en què l'estudiant pugui observar fenòmens d'atracció i repulsió que *a priori* no siguin intuïtius. Per fer-ho, podem fer servir globus inflables, fregar-los amb una tela i deixar que els estudiants hi acostin els cabells. També podem proposar-los el repte de fixar electros-

tàticament el globus en una paret. Per fer aquests experiments convé assajar abans de realitzar-los amb els estudiants, ja que no sempre surten bé a la primera. Per exemple, si fem servir globus, convé utilitzar globus de mida petita, ja que serà més fàcil que s'adhereixin a una paret en fregar-los.



Figura 4.1. Fregar una barra de plàstic provar que quedi adherit cabells d'una persona és un experiment electrostàtic simple que es pot reproduir per promoure explicacions basades en la distribució de càrregues.
Font: elaboració pròpia.

Per explicar aquests fenòmens, cal tenir en compte que es requereix una explicació «pas a pas», ja que hi solen haver com a mínim dos fenòmens electrostàtics encadenats: primer es carrega un objecte per fregament (aquest guanya o perd càrregues) i després l'objecte carregat polaritza un altre a distància (és a dir, redistribueix temporalment les seves càrregues, tot i que aquest segon objecte es manté elèctricament neutre!). En l'activitat que mostrem a continuació es proposa una explicació dividida en vinyetes en què es mostren les siluetes dels objectes que interactuen elèctricament, perquè els estudiants puguin dibuixar les càrregues en cada situació.

A més, per ajudar l'alumnat a visualitzar aquesta idea de distribució de càrregues, hi ha algunes simulacions educatives de gran qualitat didàctica i utilitat que permeten seleccionar l'opció de veure totes les càrregues o bé només la diferència de càrregues (és a dir, les situacions en què hi ha més càrregues positives que negatives, o viceversa).

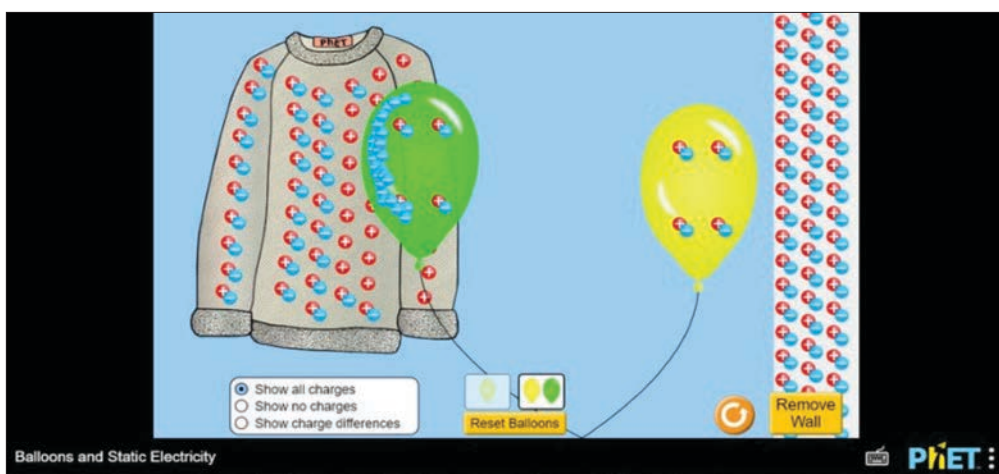


Figura 4.2. Simulació de qualitat didàctica en què es representen les càrregues que permeten explicar fenòmens electroestàtics d'atracció i repulsió. Font: PhET Colorado.

Prova-ho a l'aula

Pot un globus subjectar-se a la paret? (Primer individual i després en parelles)

Disposes d'un globus i un tros de tela de llana. Frega ambdós objectes i, posteriorment, acosta el globus a la paret. Observa què passa a l'instant, i també què s'esdevé al cap d'uns segons. A la imatge següent tens quatre vinyetes amb quatre moments clau. Dibuixa en cada vinyeta on creus que hi ha càrregues elèctriques i com estan repartides. Hi pots representar càrregues positives (+) i negatives (-).

Abans de fregar-lo	Just després de fregar-lo	Abans d'acostar el globus a la paret	Just quan el globus s'acosta a la paret

Un cop fet, revisa els teus dibuixos amb els dels companys, i busca-hi similituds i diferències. Reviseu els dibuixos per veure si compleixen les regles de les càrregues:

1. El nombre total de càrregues + i - a la primera vinyeta ha de ser igual al de la segona, ja que a l'inici tots els cossos eren elèctricament neutres.
2. El nombre total de càrregues + i - a la tercera vinyeta ha de ser igual al de la quarta, ja que el nombre total de càrregues es conserva si no fem res per guanyar-ne o perdre'n.
3. Les càrregues no es poden moure lliurement pels materials, ja que no són conductors (per exemple, metalls), sinó dielèctrics. En aquests materials les càrregues es poden desplaçar lleugerament dins de l'objecte per crear regions amb més o menys densitat de càrregues + o -.

En cas que els vostres dibuixos no compleixin alguna d'aquestes regles, com podríeu millorar-los?

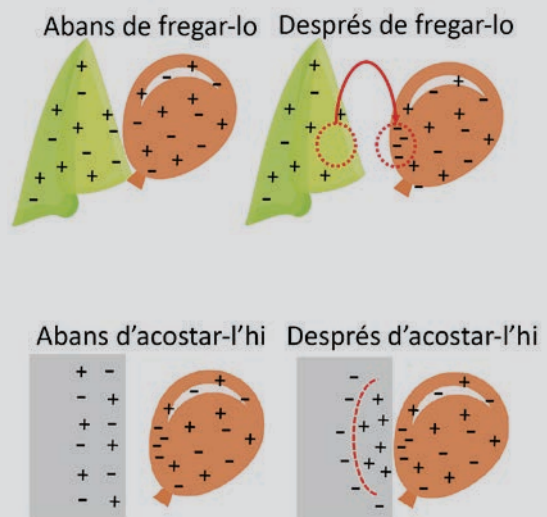
L'activitat promou que els estudiants expressin els seus models mentals, i serà tasca del docent generar discussions, tant comparant les seves respostes entre elles com aportant-hi pistes que ajudin l'estudiant a identificar les seves inconsistències. Mitjançant les regles de joc que es proposen, al final de l'activitat es pot fer una posada en comú per compartir la resposta esperada, que es podria resumir de la mateixa manera.

Abans de fregar-lo, tant el globus com la tela tenen les mateixes càrregues positives i negatives.

Just després de fregar-lo, algunes càrregues negatives han passat de la tela al globus. De fet, sempre que hi ha transferència de càrregues es tracta de transferència de càrregues negatives, ja que, d'acord amb el model atòmic que es treballa a la química de secundària, els electrons tenen més mobilitat que no pas els protons del nucli atòmic. Els objectes ja no són elèctricament neutres, tot i que en global hi ha el mateix nombre de càrregues.

En acostar el globus a la paret (que és elèctricament neutra), hi ha un petit desplaçament de les càrregues, de manera que les positives se situen més a prop del globus, i les negatives més lluny. Això fa que l'atracció entre les càrregues positives de la paret amb les negatives del globus sigui més gran que la repulsió entre les càrregues negatives d'ambdós objectes, ja que són més lluny.

Al cap d'uns instants, les càrregues del globus es transfereixen per contacte a la paret o a l'aire, i es reparteixen de manera que (tot i que no desapareixen) l'efecte es deixa de percebre. Com que el globus torna a ser elèctricament neutre, la paret recupera la seva configuració inicial, i el globus cau atret per la gravetat.

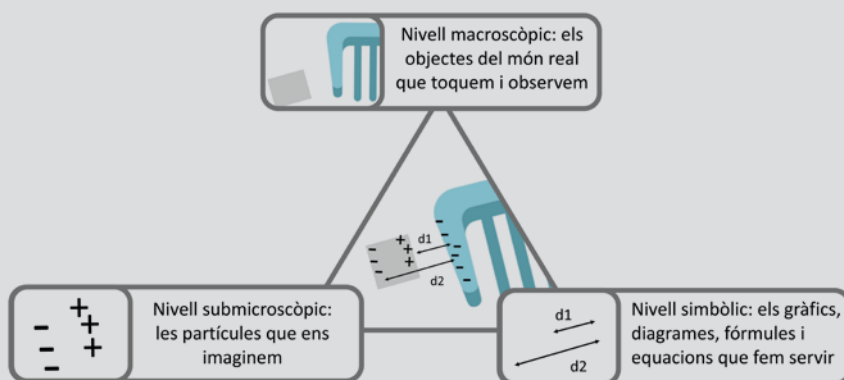


Font: Garrido, López-Simó i Pintó (2019).

El racó de pensar

Els nivells de representació de la matèria

Des de la didàctica de la química, la manera d'usar i combinar representacions que corresponen a nivells o escales diferents ha estat una qüestió de gran interès. Tot i que en física passa menys sovint (ja que la física no se centra tant en la composició de la matèria, sinó en les interaccions dels objectes), en el cas de l'electrostàtica comprendre didàcticament aquests nivells de representació és clau. El triangle de Johnstone (1991) és molt popular en didàctica de la química per organitzar les explicacions sobre la matèria: el nivell macroscòpic permet representar el que podem observar (els objectes que s'atrauen o es repel·leixen, la llum que emet una bombeta en un circuit, etc.), el nivell microscòpic o submicroscòpic se centra en la representació corpuscular (el moviment i distribució de les càrregues), i el nivell simbòlic en les equacions i representacions matemàtiques.



4.1.3. A quina versió de la idea de càrrega i interacció elèctrica volem arribar i per a què?

Al final de l'escolaritat, un estudiant hauria de ser capaç d'explicar fenòmens electroestàtics senzills fent servir la idea que la matèria conté càrregues elèctriques positives i negatives. El comportament de les càrregues s'explica amb dues regles bàsiques (que en cursos més avançats relacionarem amb la llei de Coulomb):

1. Les càrregues del mateix signe es repel·leixen i de diferent signe s'atrauen.
2. La força amb què s'atrauen/repel·leixen és proporcional a la quantitat de càrrega i inversament proporcional a la seva distància.

Aquesta idea hauria de ser coherent amb el model d'estructura atòmica que hauran après (o aprendran més endavant) a les classes de química. Atès que són part de la matèria, en tots els canvis les càrregues s'han de conservar, i no hi poden aparèixer/desaparèixer càrregues.

Per poder explicar aquests fenòmens electroestàtics, convé construir la idea de diferents propietats elèctriques de la matèria segons la facilitat amb què les càrregues es poden desplaçar:

1. En els conductors les càrregues es poden desplaçar lliurement, de manera que si hi ha excés de càrregues aquestes tendeixen a repartir-se uniformement per la superfície del conductor, per estar més allunyades les unes de les altres.
2. En els semiconductors es poden desplaçar de manera particular, com, per exemple, desplaçar-se només en una direcció o un sentit, però no en d'altres. Això permetrà, si es vol, comprendre també el funcionament bàsic d'una placa fotovoltaica.

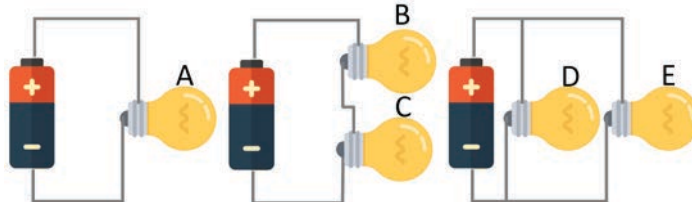
3. En els dielèctrics les càrregues estan fixes, però es poden reorganitzar lleugerament. Aquesta propietat fa que hi hagi dues maneres d'electricar els dielèctrics:
 1. La càrrega per fricció, on les càrregues – es transfereixen d'un material a un altre de manera que tots dos queden carregats elèctricament amb signe diferent.
 2. La polarització d'un dielèctric, que s'esdevé quan les seves càrregues s'orienten de manera que hi ha una zona amb més càrregues + i una altra amb més càrregues –, tot i que l'objecte en el seu conjunt continua sent neutre.

Cal tenir en compte que en aquesta versió del model de càrregues per a la secundària optem per no introduir de manera formal la idea de camp elèctric, ni tampoc els diferents elements relacionats (les línies de camp, les superfícies equipotencials, etc.), de la mateixa manera que en el capítol 3 hem optat per no introduir formalment la idea de camp gravitatori. Som conscients que això té pros i contres, però creiem que la idea de camp requereix una manera d'explicar el món molt abstracta, basada en la idea de «pertorbació de l'espai», que pot ser útil per a cursos més avançats de física, però no a la secundària obligatòria. De fet, una bona comprensió de la idea d'interacció elèctrica pot ser molt útil en cursos més avançats per entendre qualitativament fenòmens electroestàtics més complexos (com ara el funcionament d'un electroscopi, de la gàbia de Faraday, de l'efecte punta i els parallamps, etc.), i també per resoldre problemes sobre camps elèctrics propis del batxillerat.

4.2. La idea d'intensitat en un circuit elèctric

Abans de començar... Posa a prova les teves idees

Els tres circuits situats a sota contenen bombetes idèntiques i piles també idèntiques. Considera que les piles són ideals, és a dir, que no tenen resistència interna. Suposant que tots els circuits estan tancats i hi circula corrent elèctric, ordena les bombetes A-E segons la seva brillantor. Explica el teu raonament.



Llegiu-ho després d'haver respost individualment

La varietat de respostes que s'obtenen, fins i tot amb estudiants que suposadament dominen matemàticament la llei d'Ohm, és molt gran. A continuació mirem de resumir les més comunes, tot i que l'experiència ens mostra que n'hi ha moltes més i que fins i tot apareixen entremesclades :

1. «Totes les bombetes brillaran igual, ja que el voltatge de la pila és el mateix».
2. «Les bombetes D i E són les que menys brillaran, ja que el corrent que surt de la pila es divideix en dos, i arriba menys a cada pila».
3. «La bombeta E és la que menys brillarà, ja que està més lluny i li arriba menys electricitat».
4. «La bombeta C brillarà menys que la B, ja que part de l'electricitat que surt de la pila es gasta a la primera bombeta».

La resposta correcta, que es pot comprovar fàcilment usant petits circuits amb material simple de laboratori, o bé amb simulacions virtuals, és que les bombetes A, D i E brillaran les tres igual, ja que les tres estan connectades a la mateixa diferència de potencial que ofereix la pila. Les bombetes B i C brillaran menys que les altres, però entre elles també brillaran igual.

La idea que dues piles connectades en paral·lel puguin brillar igual que una de sola és clarament antiintuïtiva, ja que el nostre raonament intuïtiu ens porta a pensar que, si hi ha més bombetes, el corrent que surti de la pila s'haurà de repartir més. No obstant això, la confusió es deu a pensar que la pila ofereix un corrent constant, cosa que no passa. En haver-hi dues bombetes D i E en paral·lel, els electrons tenen més facilitat de moure's pel circuit, i la intensitat total serà el doble. Evidentment, el treball elèctric que farà la pila serà també el doble, per la qual cosa trigarà la meitat de temps a gastar-se. Però mentre duri, D i E brillaran igual que A.

4.2.1. El punt de partida de l'alumnat sobre la idea d'intensitat elèctrica en un circuit

Els nois i noies arriben a secundària amb un cert coneixement previ sobre circuits, sigui perquè en la seva primera escolaritat han experimentat amb circuits (coneixen les parts d'un circuit, els tipus de materials segons la conductivitat, etc.), o simplement perquè en la vida quotidiana han manipulat aparells elèctrics, han endollat electrodomèstics al corrent domèstic, han fet servir joguines que funcionen amb piles, etc. El problema, com estem assenyalant al llarg del llibre, és que els raonaments espontanis i les idees que construïm de manera intuïtiva no sempre permeten explicar situacions com ara per què la brillantor de les bombetes és diferent segons si estan connectades en sèrie o en paral·lel. A continuació, hem seleccionat algunes de les idees alternatives i confusions més comunes.

a. Confusions entre les magnituds elèctriques

En primer lloc, una dificultat a l'hora d'interpretar el que passa en els circuits elèctrics és que per a molts estudiants totes les magnituds elèctriques són el mateix, o una cosa molt semblant que no saben distingir:

pel circuit circula corrent, que és el mateix que electricitat, que és el mateix que voltatge, que és el mateix que energia, que és el mateix que càrregues. És a dir, que totes elles són paraules que ressonen a la temàtica dels circuits, però sense comprendre'n el significat.

b. Idees alternatives respecte a la direcció del corrent elèctric

En edats primerenques, i a causa del mateix aspecte físic de molts aparells elèctrics (per exemple, quan endollem amb un «únic» cable) hi ha la concepció segons la qual el corrent elèctric flueix des d'un born d'un generador fins a la bombeta o qualsevol altre element receptor, a través d'un únic fil de contacte, que és el que ells perceben. Per això, quan a l'escola de primària es proposa que construeixin un circuit elèctric, al principi molts alumnes no veuen la necessitat dels dos terminals de la pila amb els dos terminals d'una bombeta, sinó que amb un dels cables entre la bateria i la bombeta ja n'hi ha prou. Aquest model mental s'anomena unipolar, i és molt comú en edats primerenques i no tant a secundària.

Per superar aquesta idea, a l'escola primària normalment s'ensenya que cal un segon cable per tancar el circuit, ja que, si no, no hi pot circular corrent. Tot i així, en alguns casos l'alumnat pot pensar que aquest segon cable no fa res, o bé que serveix per portar més corrent a la bombeta (model concurrent). Encara que avui dia pugui semblar una idea còmica, aquesta idea històricament va ser sostinguda pel físic francès Ampère a principis del segle XIX.

En altres versions alternatives, les càrregues positives que surten d'un born de la pila i les negatives que surten de l'altre són les que circulen pel circuit, de manera que quan arriben a la bombeta ambdues càrregues xoquen i així s'encén la llum, el que alguns autors de didàctica de la física van descriure com a model mental de «corrents antagonistes».

c. Idees alternatives respecte a la intensitat del corrent

Altres explicacions comunes sí que es basen en el fet que el corrent circula en un sol sentit, però es considera que hi ha menys corrent en el fil de «tornada», ja que aquesta es va gastant a mesura que va passant pel circuit; alguns estudiosos l'han anomenat model mental d'atenuació del corrent. En altres estudis s'ha trobat que l'alumnat afirma que la pila sempre atorga una quantitat d'intensitat, i que no depèn de la configuració del circuit, sinó només de la mateixa pila. Aquest model mental, sovint definit com a model d'intensitat constant, dificulta molt que l'alumnat faci prediccions sobre què passarà en un circuit quan es col·loquen diferents elements en paral·lel.

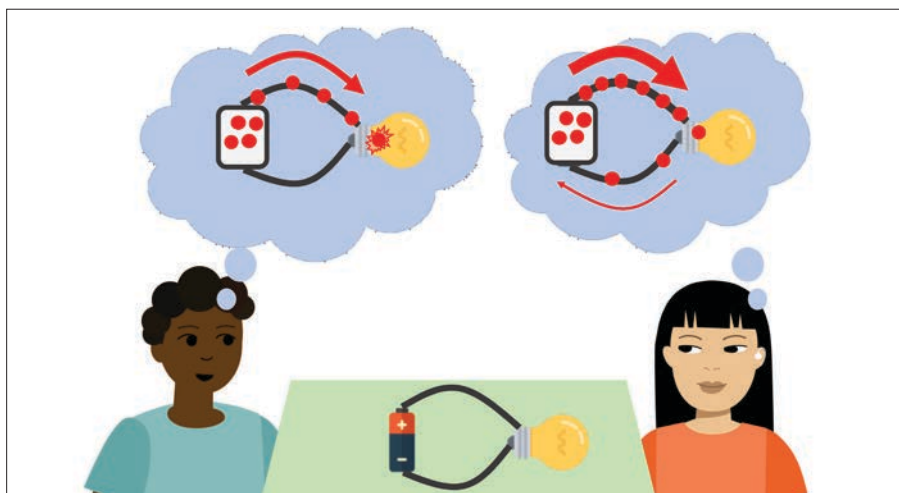


Figura 4.3. Dues variants del model d'atenuació del corrent en passar per un element receptor del circuit: A l'esquerra, les càrregues només viatgen de la pila a la bombeta i allà es gasten per encendre-la. A la dreta, el flux de corrent és major a l'anada que a la tornada, ja que part del flux es gasta a la pila. Font: elaboració pròpia.

4.2.2. Com ajudem a construir la idea d'intensitat en un circuit

En primer lloc, creiem que no té sentit ensenyar circuits elèctrics només a partir d'una aproximació matemàtica sense una comprensió conceptual al darrere, i molt menys fer-ho sobre la base de regles mnemotècniques i rituals absurds com la famosa «regla del triangle de la llei d'Ohm». Aquest tipus d'estratègies aparenten ser eficaces per resoldre problemes numèrics, però difícilment ajuden a una comprensió real del que s'esdevé en un circuit. Amb això no volem dir que calgui desterrar del tot les equacions, sinó que aquestes tenen sentit quan l'estudiant ja disposa d'un domini qualitatiu de la relació entre magnituds elèctriques i els fenòmens elèctrics, no abans.

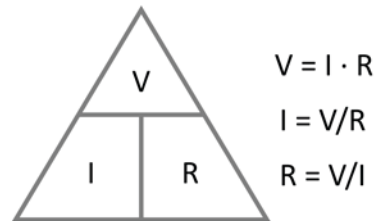


Figura 4.4. El triangle de la llei d'Ohm sembla oferir una drecera a l'alumnat per resoldre problemes, però dificulta una veritable comprensió del model de circuit elèctric. Font: elaboració pròpia.

De fet, la nostra proposta és començar per parlar d'una cosa que sigui observable i no abstracta. No és casual que la qüestió que hem plantejat a l'inici de l'apartat 4.2 no es referís a la intensitat sinó a la brillantor (que és una manera indirecta de mesurar la intensitat). Proposar diferents components d'un circuit (piles, cables conductors, bombetes, resistències, interruptors) permet proposar petits reptes als estudiants, que puguin fer prediccions sobre «quina bombeta brillarà més/menys» en diferents condicions, i que puguin posar a prova les seves idees mitjançant els experiments. Si es disposa d'aparells per mesurar, com ara un voltímetre, es pot quantificar el valor de la intensitat i del voltatge en diferents punts del circuit, i discutir els resultats obtinguts.

Si no es disposa de material de laboratori suficient, o bé es considera que no es té temps per a aquestes activitats, també es poden fer experiments virtuals, en què l'alumnat pugui construir igualment circuits elèctrics, reproduir diferents situacions, observar la brillantor de cada bombeta en cada situació i fer mesuraments d'intensitat i voltatge.

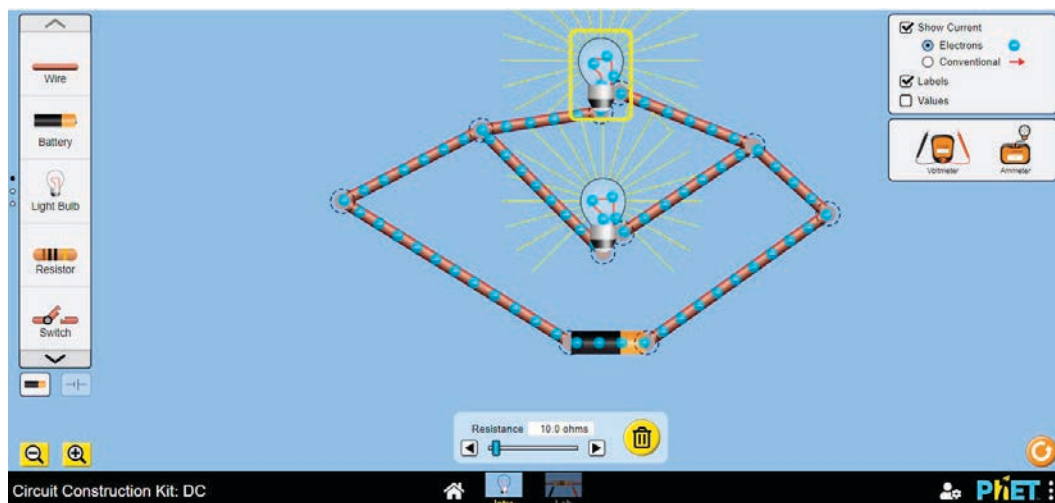


Figura 4.5. Simulació que permet construir petits circuits elèctrics i observar simultàniament la brillantor de la bombeta (macroscòpic) i el moviment de les càrregues elèctriques (submicroscòpic). Font: PhET Colorado.

A mesura que els estudiants vagin experimentant (en un entorn real o virtual), convé anar establint quines regles de joc permeten explicar el que passa en cada circuit. A grans trets, creiem que aquestes es poden resumir en dues úniques regles de joc, sobre les quals hauríem de centrar l'atenció:

1. Les bombetes i les resistències són obstacles per al pas de corrent elèctric. Com més elements en sèrie hi hagi, la resistència total serà més gran, ja que cada càrrega elèctrica haurà de superar més obstacles. Com més elements en paral·lel hi hagi, la resistència serà menor, ja que s'ofereixen camins alternatius pels quals el corrent pot circular.
2. La pila no subministra sempre el mateix corrent, sinó la mateixa energia a cada càrrega que conforma el corrent. La pila no determina per si sola quantes càrregues circulen pel circuit (corrent), sinó que el pas de càrregues serà una combinació de quanta energia pot donar la pila a cadascuna i com de fàcil/difícil al pas de càrregues es presenta la combinació d'elements del circuit.

A tot això, s'hi pot incorporar un matís: en realitat, la càrrega (els electrons) viatgen en sentit negatiu del corrent elèctric. Però tampoc creiem que aquest fet sigui l'element central de l'ensenyament dels circuits elèctrics, ja que el seu valor afegit per construir el model és petit.

Per ajudar a construir aquest conjunt de relacions, es poden fer servir diferents models analògics, i de fet, des de la didàctica de la física se n'han proposat molts i de molt variats. Hi ha analogies relacionades amb algun sistema hidràulic (un circuit d'aigua tancat amb zones a diferent altura o diferent pressió per representar la diferència de potencial elèctric), o bé amb algun sistema de tracció mecànica, com una cinta transportadora moguda per políctges motrius, cadenes de tracció amb plats i pinyons com els de la bicicleta, o simplement una corda que gira impulsada a mà. També hi ha altres analogies basades en un circuit de distribució de vehicles (trens o furgonetes de repartiment) que fan viatges entre dos punts d'anada (carregats) i tornada (descarregats). Cadascuna d'aquestes analogies té avantatges i inconvenients, i tot i que cap d'elles és prou fidel al model que volem que l'alumnat construeixi, el pot ajudar a comprendre la diferència entre voltatge, intensitat i resistència en un circuit simple.

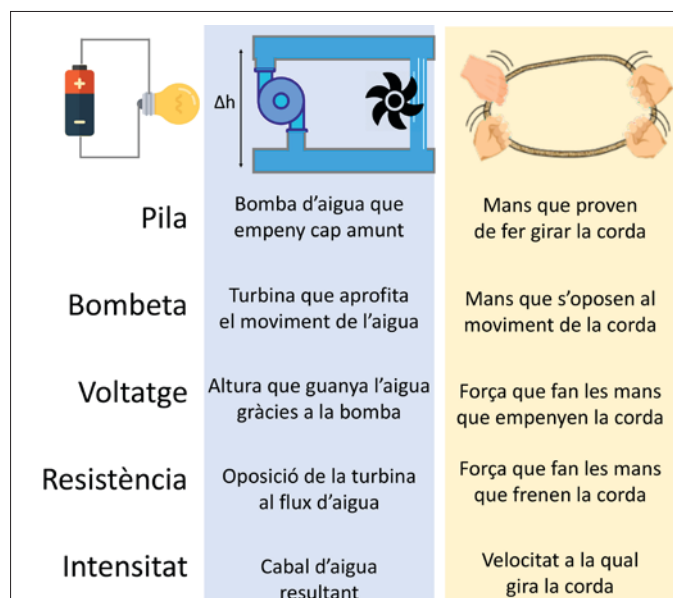


Figura 4.6. Diferents representacions de models analògics per representar el corrent elèctric, on hi ha una equivalència entre els elements i les magnituds d'un circuit amb altres elements mecànics. Font: elaboració pròpia.

Prova-ho a l'aula

Les bombetes sempre il·luminaran igual? (Individual)

Suposa que tens un petit circuit format per una bombeta, una pila i dos cables que els uneixen formant un circuit tancat.



Que li passa a la bombeta si...	Predicció	Justificació
...canviem el cable que connecta la bombeta amb la pila per un altre de molt més llarg?	<input type="checkbox"/> Brillarà igual <input type="checkbox"/> Brillarà més <input type="checkbox"/> Brillarà menys	
...connectem una resistència en sèrie, darrere de la bombeta en el mateix circuit?	<input type="checkbox"/> Brillarà igual <input type="checkbox"/> Brillarà més <input type="checkbox"/> Brillarà menys	
...connectem una resistència en sèrie, davant de la bombeta en el mateix circuit?	<input type="checkbox"/> Brillarà igual <input type="checkbox"/> Brillarà més <input type="checkbox"/> Brillarà menys	
...connectem una resistència en paral·lel, connectada als borns de la pila amb nous cables?	<input type="checkbox"/> Brillarà igual <input type="checkbox"/> Brillarà més <input type="checkbox"/> Brillarà menys	

En aquest enllaç trobaràs un laboratori virtual de circuits elèctrics:

<https://phet.colorado.edu/es/simulation/circuit-construction-kit-dc-virtual-lab>

En què s'assembla la teva predicció als resultats obtinguts? En què es diferencia?

A quina conclusió pots arribar? De quins factors depèn que la bombeta brilli més o menys?

.....

.....

Amb aquesta activitat, inclosa dins dels materials «10 experiments científics amb simulacions» del grup DIATIC, l'alumnat pot construir els seus circuits de manera senzilla, i observar què li passa a la brillantor de la bombeta en cada situació, per així comparar les seves prediccions amb el que s'esdevé realment. Cada predicció va acompanyada d'una justificació, de manera que, si la predicció no coincideix amb el que passa, l'obliga a revisar l'explicació que s'ha fet servir en la justificació.

En aquest cas es plantegen a l'estudiant quatre situacions diferents, orientades a què l'estudiant entengui que la intensitat de corrent no depèn de la longitud del cable, ni tampoc de la quantitat de resistències en paral·lel, però que sí que es veurà afectada per resistències en sèrie, independentment de si aquestes se situen abans o després de la bombeta. Aquestes evidències han de contribuir a construir el model de circuit elèctric d'acord amb les dues idees abans esmentades.

4.2.3. A quina versió de la idea d'intensitat en un circuit elèctric volem arribar i per a què?

Al final de l'escolaritat obligatòria, un estudiant hauria d'entendre que parlem d'electricitat per referir-nos al corrent elèctric, és a dir, el moviment de càrregues elèctriques que es dona simultàniament en tots els punts d'un circuit tancat. Les càrregues d'un circuit provenen del mateix material conductor que configura el circuit (els materials conductors tenen càrregues lliures, a causa de l'enllaç metàl·lic entre els seus àtoms), i el que varia és la intensitat amb la qual circulen aquestes càrregues, que es mesura en amperes, una manera de quantificar les càrregues per segon que circulen per cada punt del circuit. Aquesta intensitat és, alhora, el resultat de dues altres magnituds: el voltatge (o diferència de potencial) que provoca la pila i la resistència que ofereix el circuit al moviment de càrregues.

El voltatge de la font del circuit (per exemple de la pila) s'expressa numèricament en volts i representa quanta energia aporta la font en cada càrrega. És a dir, el voltatge es relaciona amb la capacitat de cada càrrega per moure's pel circuit i provocar canvis. En aquesta aproximació al voltatge o potencial elèctric no és ni tan sols necessari comprendre al cent per cent què és l'energia (parlarem de l'energia i la seva relació amb els canvis en el capítol 6, i hi veurem que la idea d'energia no és gens trivial), però sí que convé començar a imaginar que la pila, la bateria, la placa solar, l'endoll... donen a les càrregues d'un circuit una capacitat per «fer coses», per provocar canvis, i a mesura que provoquen nous canvis (encenen un llum, generen un so, provoquen un moviment...), perden aquesta capacitat, però no es gasten ni s'aturen, sinó que continuen circulant pel circuit. I la intensitat d'aquest corrent elèctric també dependrà de la resistència que oposen els altres elements del circuit al pas de les càrregues, que es mesura en ohms. Quan els elements del circuit estan en sèrie, les càrregues ho tenen més difícil per circular, ja que es troben sí o sí amb més obstacles. Quan estan en paral·lel, les càrregues tenen més facilitat de circular, ja que disposen de més camins alternatius per on passar. Com que la capacitat de la font per fer moure aquestes càrregues és finita, la potència que necessitarà per fer-ho dependrà tant de quanta energia es transfereix a cada càrrega com de quantes càrregues circulin, per la qual cosa numèricament $P = V \cdot I$, i en la seva equivalència en unitats $1W = 1V \cdot 1A$. Per saber l'energia total consumida en un circuit, a més de la potència, caldrà tenir en compte el temps, per la qual cosa el consum elèctric es mesura en kWh.

Aquest model científic escolar de circuit hauria de permetre a un estudiant entendre conceptualment les relacions matemàtiques que s'estableixen entre les magnituds d'un circuit elèctric, i no simplement repetir i reproduir acríticament problemes de càlcul. De fet, malgrat que $V = I \cdot R$ i $I = V/R$ puguin semblar dues relacions algebraïques equivalents, ja que «una lletra passa multiplicant a l'altra banda», el significat físic en canvia completament. La primera, $V = I \cdot R$, serveix per expressar que la diferència de potencial entre dos punts d'un circuit és proporcional a la intensitat de corrent i la resistència entre aquests dos punts, però en el context d'un experiment amb circuits simples no serviria per expressar una relació de causalitat. En canvi, quan es diu que $I = V/R$, sí que s'està expressant una relació de causa-efecte, ja que la intensitat d'un circuit serà el resultat entre el potencial que aporta la pila i la resistència que ofereixen la resta d'elements del circuit.

Fora de l'aula, aquest model permet explicar de manera simple el comportament elèctric dels aparells i els sistemes que té al seu voltant (a casa, a la xarxa elèctrica, a les centrals, etc.), com també prendre mesures per al seu bon ús. Per exemple, suposem que algú va de vacances a un càmping, i en fer la inscripció el recepcionista li pregunta si prefereix contractar per a la seva parcel·la un amperatge de 3, 6 o 10 amperes. El campista hauria de ser capaç de fer aquest raonament: «L'endoll està connectat a 220V, per la qual cosa la potència de què disposaré serà diferent segons la intensitat que m'ofereixin». Així, si és hivern i el campista pensa que haurà de fer servir una calefacció de 1000W, hauria de raonar que amb 3A no en tindrà prou, i amb 6A potser li salti el diferencial si, a més de la calefacció, té algun altre aparell elèctric. En canvi, si és estiu i simplement vol tenir una mica de llum (un parell de bombetes de 50W) i mantenir la nevera de 200W encesa, potser n'hi ha prou amb una intensitat de 3A.

A més, per a aquells estudiants que prossegueixin l'estudi de la física, haver construït un model simple però robust de circuit elèctric els permetrà afrontar millor els problemes de circuits més complexos (per exemple, les regles de Kirchoff), o també abordar matemàticament la caracterització del corrent altern, que no haurà estat vista en l'educació obligatòria.

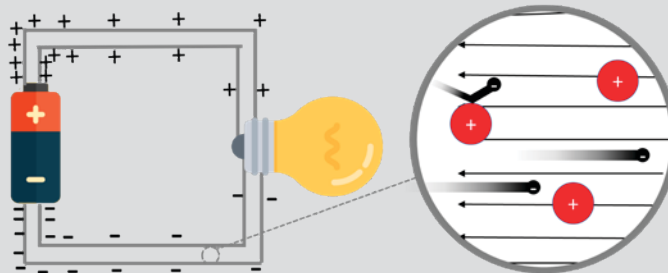
El racó de pensar

És realment la font la que fa moure les càrregues? I com pot interactuar a distància amb les càrregues de tot el circuit?

A les pàgines anteriors hem fet una simplificació necessària basada en criteris didàctics, que trobem oportuna a l'educació secundària, però que també caldria matisar. Tant en la simulació de la figura 4.5 com en les dues analogies que hem presentat a la figura 4.6 es parteix de la premissa que la font (la pila, la bateria, el generador, etc.) és l'element del circuit que fa moure les càrregues (electrons) que corren pel circuit. Però això ens planteja una altra pregunta: si tots els electrons es mouen simultàniament pel circuit, com s'ho fa la font per «fer moure» els electrons que n'estan allunyats?

Malauradament, aquesta confusió és insalvable en aquestes edats, ja que l'alternativa seria parlar en termes de camp elèctric dins el material conductor, cosa que hem descartat a l'inici del capítol a causa de la complexitat conceptual que implicaria. Però, per si t'ho havies preguntat, com pot la font crear aquest camp elèctric i aconseguir fer moure totes les càrregues alhora?

La resposta és que la pila no mou directament les càrregues del circuit, sinó que genera una distribució de càrregues a la superfície de tot el conductor, en què la concentració de càrregues és més gran com més a prop està de la pila.



Alhora, aquesta distribució de càrregues genera un camp elèctric constant dins del conductor, que sempre apunta de la zona amb càrregues + a la de càrregues -. (De fet, també genera un camp elèctric a l'exterior, però aquest és encara més complex de descriure sense fer servir les principals equacions de l'electromagnetisme.) Els electrons lliures del cable, la bombeta o la resistència que ja tenen per si sols un moviment de vibració aleatori se senten atrets per aquest camp, i al ser -, viatgen en sentit contrari al del camp, tot i que ho fan a una velocitat de deriva molt i molt petita. En fer-ho, en alguns casos col·lideixen amb els àtoms que formen el material, i això explica la dissipació d'energia que coneixem com a efecte Joule.

Per explicar el fet que la pila no empeny directament les càrregues del circuit, sinó que genera un camp elèctric a través de la reconfiguració de les càrregues a la superfície del conductor, l'enginyer i *youtuber* Ben Watson va proposar una analogia: la pila seria un pastor que vol moure les ovelles (els electrons), però no les mou directament, sinó que disposa de gossos pastor (les càrregues en superfície) per fer-ho.

4.3. La idea d'imant i d'interacció magnètica

Abans de començar... Posa a prova les teves idees	
<p>Imagina que disposes d'una típica barra magnètica de les que hi ha a moltes escoles, en què es poden identificar fàcilment els pols nord i sud. També disposes de sis petites brúixoles amb una agulla que indica l'orientació del camp magnètic, i que es fan servir popularment per «assenyalar el nord». Imagina que situes les sis brúixoles en diferents punts al voltant de l'imant, com en aquesta figura. Cap a on creus que apuntarà l'agulla de cada brúixola?</p>	
Llegiu-ho després d'haver respost individualment	
<p><i>Si formules aquesta pregunta a estudiants i els proposes que dibuixin la direcció de l'agulla de la brúixola en cada posició, podràs veure com a mínim tres models mentals diferents sobre camp magnètic. Alguns estudiants simplement dibuixen totes les agulles apuntant horitzontalment de dreta a esquerra, ja que, si la brúixola «apunta cap al nord», el nord estarà sempre cap a l'esquerra.</i></p>	
<p><i>Altres respostes que pots trobar són aquelles en què totes les agulles de les brúixoles apunten cap al nord, entès com el tros d'imant pintat de vermell.</i></p>	
<p><i>No obstant això, si realitzem un experiment a classe, observarem que no s'esdevé cap de les dues coses, però sí una combinació de totes dues: les agulles de les brúixoles més properes al pol nord hi apuntaran, i les més properes al pol sud apuntaran en sentit contrari. Sorprenentment, les agulles que es trobin a mig camí d'ambdós pols apuntaran, com en el primer cas, cap a l'esquerra. Com és possible?</i></p>	

4.3.1. El punt de partida de l'alumnat sobre les idees d'imant i d'inducció electromagnètica

Els imants solen ser objectes fascinants durant la primera infància. Acostumats a les interaccions mecàniques, observar com una peça de matèria pot atreure'n d'altres a distància és una cosa sorprenent. A les escoles de primària l'alumnat acostuma a mostrar interès pel magnetisme, cosa que porta molts docents a fer servir en algun moment o altre de l'escolaritat jocs o activitats basades en imants. Això no obstant, plantejar una explicació formal sobre magnetisme abans dels 12 anys no només és difícil, sinó que directament serà molt poc efectiu. Però, com defensem al llarg del llibre, això no treu que puguem promoure que l'alumnat descriu les interaccions físiques i que experimenti amb diferents forces (totes són igual d'intenses?, tots els materials experimenten el mateix comportament en acostar-se a un imant?...).

En l'educació secundària, l'ensenyament del magnetisme és força poc comú, i tot i que els llibres de text poden donar alguna pinzellada sobre el tema, rarament els docents dediquen hores de la docència a treballar aquesta qüestió. I és que la barrera per entendre una explicació formal de les propietats i les interaccions està vista com una cosa difícil d'assolir, i de nou hi ha dubtes sobre si cal plantejar el magnetisme a nivell micros-

còpic o centrar-se en el nivell macroscòpic, i també si s'ha de matematitzar el camp magnètic com en els cursos de física postobligatoris. Al batxillerat, el magnetisme té un paper molt important en la física i en altres assignatures tecnològiques, com l'electrotècnia, ja que és la base per comprendre els fenòmens electromagnètics, i s'hi ensenya la força de Lorentz (que requereix un raonament tridimensional), el moviment circular d'un electró dins d'un camp magnètic, la llei de Faraday-Lenz, etc. En canvi, en l'etapa dels 12 als 16 anys, el professorat i les editorials de llibres de text solen considerar que fer servir imants a classe és massa simple per observar-ne tan sols el comportament, però massa abstracte i complex per abordar-ho matemàticament.

De fet, si repassem la recerca en ensenyament del magnetisme, trobem que, llevat d'excepcions, aquestes se centren en l'ensenyament en edats a partir dels 16 anys, i en la majoria de casos són investigacions realitzades amb estudiants universitaris, a diferència de la prolífica recerca en l'aprenentatge dels circuits elèctrics en l'etapa 12-16 que hem vist a l'apartat anterior. No obstant això, considerem que hi ha algunes idees i confusions que sí que convindria tenir presents per poder revisar-les i reformular-les d'acord amb el model científic escolar de magnetisme adaptat a l'educació secundària obligatòria.

a. Idees científiques sobre magnetisme

Com hem dit, el magnetisme acostuma a provocar la fascinació de les criatures petites, ja que implica l'existència de forces a distància que podem sentir, però no veure. Ara bé, això no sempre s'explica en termes científics, ja que en la cultura popular sol atribuir-se al magnetisme propietats sorprenents. Per exemple, en el cinema o en la ciència-ficció, el magnetisme es planteja moltes vegades com un superpoder. De la mateixa manera, en el món de les pseudociències sovint es fa un ús fraudulent del magnetisme, atribuint-li suposades propietats màgiques i miraculoses que ajuden a regular el nostre equilibri vital i a curar tota mena de malalties.



Figura 4.7. Esquerra: exemple d'un superheroi amb superpoders de naturalesa electromagnètica. Font: DallE2. Dreta: anunci comercial d'aigua magnetitzada amb suposats poders miraculosos. Font: Xarxes socials de Milagro.

b. La idea que un imant interactua amb qualsevol objecte metàl·lic

Tot i que els imants només interactuen amb alguns metalls molt concrets que tenen propietats ferromagnètiques (el ferro o el níquel), és comú observar en l'alumnat la idea que un imant pot atraure qualsevol metall. Aquesta idea, de fet, no és exclusiva de l'alumnat de secundària, sinó que apareix sovint en l'imaginari popular. Per exemple, a la figura 4.8 veiem una vinyeta de Mortadelo i Filemón, on l'imant és capaç d'atraure l'or.



Figura 4.8. Exemple d'idea alternativa sobre magnetisme en el còmic. Font: Carrascosa (2006).

De nou, observem que aquesta concepció no és exclusiva de la ficció, sinó que hi ha, per exemple, aplicacions comercials que asseguren servir com a detector d'or a través del sensor de magnetisme de què disposa el telèfon mòbil, quan en realitat la interacció de l'or i l'imant és molt petita.



Figura 4.9. Exemple d'aplicació fraudulenta que promet detectar or a través del camp magnètic. Font: Google Play.

c. Confusions en relació amb la interacció imant-bobina en la inducció electromagnètica

Quan es demana a un estudiant que expliqui el fenomen de generació d'electricitat que es dona en qualsevol generador elèctric, també hi solen aparèixer confusions entre la interacció a distància i la interacció mecànica, de manera que la generació es planteja en termes de fricció i forces i no d'inducció electromagnètica. D'una banda, trobem l'explicació segons la qual una bobina és una obertura del circuit elèctric, de manera que quan l'imant s'introdueix a la bobina, es tanca el circuit i així es genera electricitat. De l'altra, trobem la idea que el moviment de l'imant respecte a la bobina requereix fregament, amb la qual cosa es fa un símil amb la càrrega electrostàtica de la qual hem parlat a l'apartat 4.1.

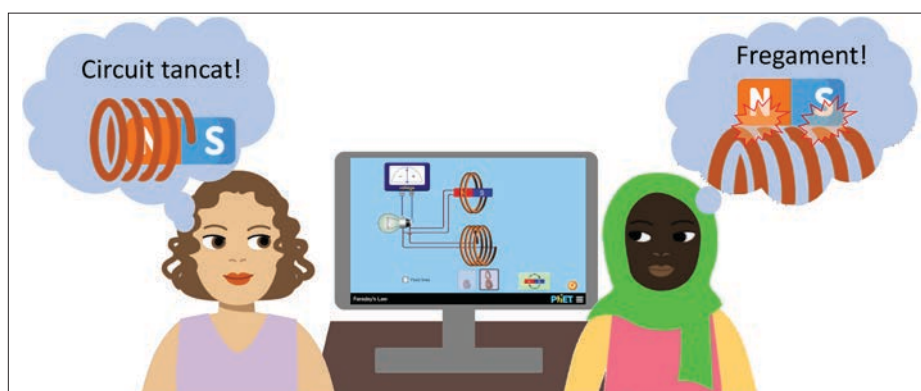


Figura 4.10. Dues explicacions alternatives de la inducció electromagnètica que es basen en el contacte mecànic i no l'acció a distància entre la bobina i l'imant. Adaptat de López i Pintó (2017).

4.3.2. Com ajudem a construir la idea d'imant i d'inducció electromagnètica?

En comptes de començar traient imants a classe perquè els estudiants hi experimentin, és interessant portar objectes que es puguin desmuntar i que, per sorpresa de l'alumnat, continguin un imant dins: una dinamo que ja no funcioni, un altaveu malmès, una llanterna manual, etc. Això obliga a preguntar-se per a què aquests objectes tindran un imant dins i començar a discutir sobre com interactua un imant amb les altres peces en aquests objectes elèctrics.

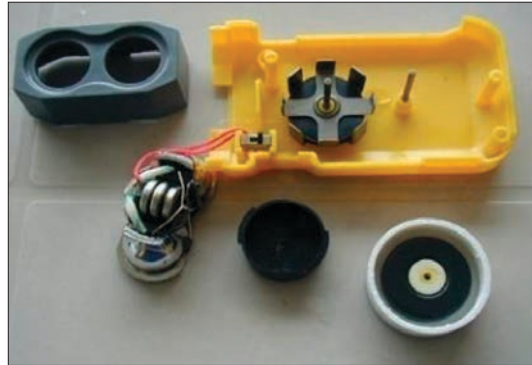


Figura 4.11. Una dinamo o una llanterna amb generador desmuntades. Font: elaboració pròpia.

Una vegada hem sentit la necessitat d'investigar sobre els imants, és interessant observar-ne les propietats amb diferents dispositius experimentals. Per exemple, si es disposa de petites brúixoles, es pot investigar sobre la seva orientació a prop d'un imant, per establir patrons de direcció que ajudin a pensar en les línies de camp. També es pot fer servir el sensor de magnetisme del mòbil, tant per mesurar la intensitat com la direcció del camp magnètic en cada punt de l'espai.

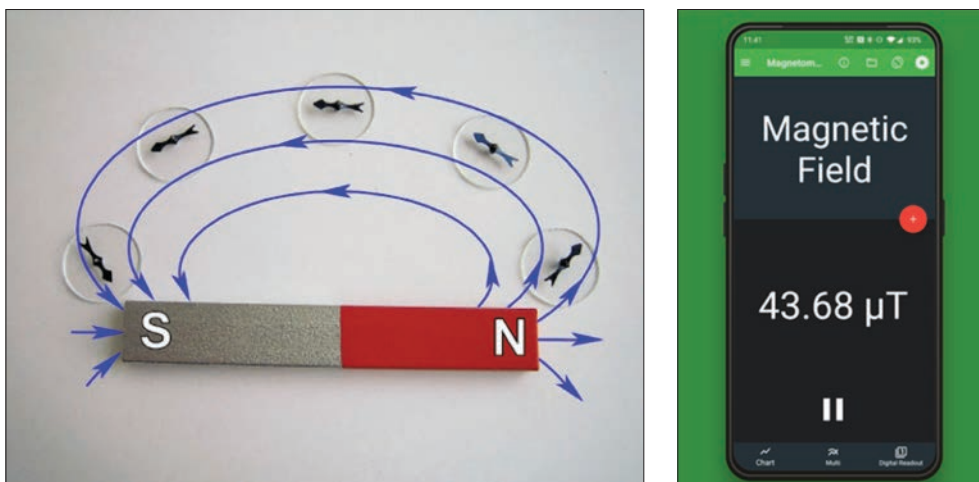


Figura 4.12. Experiments per representar l'orientació del camp magnètic usant brúixoles o un sensor de magnetisme. Font: elaboració pròpia.

Després d'haver investigat les propietats dels imants, es pot introduir la inducció, movent imants prop de bobines connectades a un sensor o una bombeta, i observar que en alguns casos s'està generant corrent. També es pot proposar a l'alumnat que construeixi les seves pròpies bobines, tot i que es requereixen moltes espiras per observar algun efecte, a diferència del que es mostra de vegades en els llibres de text mitjançant situaci-

ons idealitzades. Si es disposa de sensor de voltatge o d'intensitat, es poden connectar als extrems d'aquestes bobines i observar la forma del gràfic (s'hi observen pics). Així, un cop s'ha vist que el moviment d'un imant a prop o dins d'una espira indueix corrent elèctric, es pot preguntar a l'estudiant: «com ho faries per generar corrent de manera continuada?». Això permet pensar en mecanismes de moviment relatiu entre un imant i una bobina, endinsant-se en el món dels generadors i els motors elèctrics. Aquí apareixen de nou moltes opcions, com desmuntar aparells electromecànics, usar generadors manuals educatius (hi ha moltes empreses que els comercialitzen), o fer servir simulacions virtuals en què s'observin fenòmens d'inducció electromagnètica. Segons convingui, es pot incidir en la idea qualitativa de la simetria entre generar corrent a partir del moviment (concepte de generador) i generar moviment a partir d'un corrent elèctric (concepte de motor elèctric).

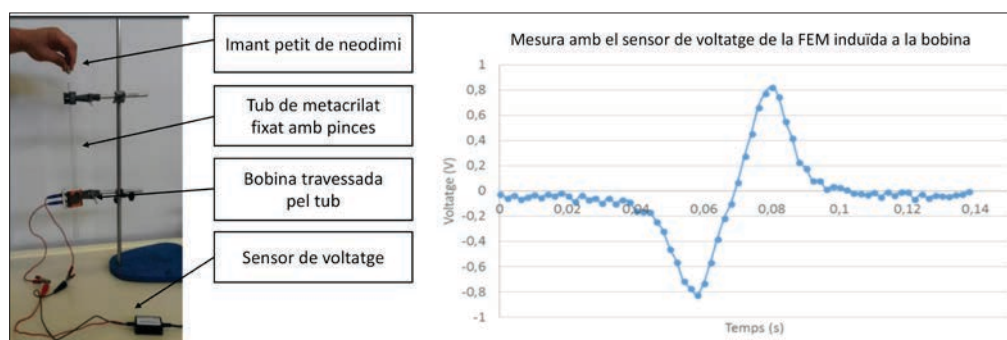


Figura 4.13. Experiment que permet mesurar la inducció electromagnètica sobre una bobina travessada per un tub de metacrilat pel qual es deixa caure un imant de neodimi. L'imant, que triga poques centèsimes de segon a travessar la bobina, amb el seu moviment provoca una diferència de potencial dins la bobina amb dos pics de sentit contrari. Aquest experiment pot ser l'avantsala d'altres experiments d'inducció electromagnètica amb generadors, ja que la forma sinusoidal del corrent induït pot comprendre's com la suma de pics positius i negatius com els de la gràfica.

Font: López-Simó (2018).

Prova-ho a l'aula

Dos imants petits en fan un de gran? (en parelles)

Imagina que treballes en un taller de construcció de trens de levitació magnètica. Necessiteu disposar d'imants grans, però només teniu imants petits, que es poden combinar per crear-ne un de gran. T'han demanat que facis una investigació per saber quina combinació d'imants serà la que et convé més.

1. Feu una llista de totes les formes amb què pots combinar dos imants. Tingueu en compte que hi pot haver formes que no siguin estables (és a dir, que els dos imants es repel·leixin). En aquests casos, feu servir una goma per mantenir els dos imants fixats.
2. Feu servir el sensor del mòbil per mesurar la intensitat del camp magnètic que genera aquesta combinació d'imants en cadascun dels dos extrems. Recordeu col·locar el mòbil sempre en la mateixa posició, i sempre amb una distància de seguretat mínima de 5 cm entre el mòbil i l'imant.

Posició	És estable?	Intensitat del camp a l'esquerra	Intensitat del camp a la dreta

3. Després de completar la taula, argumenteu quina creieu que és la millor combinació, i feu servir els vostres coneixements sobre imants per mirar de donar-hi una explicació.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

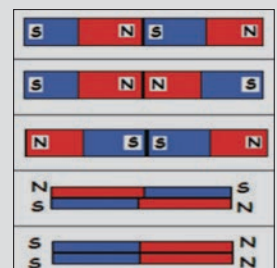
.....

.....

.....

En aquesta activitat, adaptada de la UD «Les propietats electromagnètiques dels materials» (Pintó et al. 2010), es proposen diferents combinacions d'imants, com les que es mostren a la figura.

Això permet a l'alumnat imaginar com diferents imants degudament apilats tenen les mateixes característiques que un únic imant més gran i potent, que genera al seu voltant un camp més potent. De la mateixa manera, també es pot proposar a l'alumnat que trenqui un imant gran i n'obtingui dos de més petits, amb la qual cosa s'adonarà que cadascuna de les parts torna a tenir un pol nord i sud seguint la mateixa direccionalitat que l'imant inicial.



4.3.3. A quina versió de la idea d'imant i interacció electromagnètica volem arribar i per a què?

El grau de profunditat amb què volem abordar el magnetisme és difícil de definir en abstracte, ja que pot dependre molt del curs, del coneixement científic de cada estudiant, del temps que es vulgui dedicar a treballar el magnetisme a l'aula, etc. En alguns casos simplement podem concloure que el magnetisme és una propietat específica d'alguns materials, anomenats imants, que els permet interactuar amb altres materials (els ferromagnètics), i que podem representar aquesta capacitat per interactuar com una pertorbació de l'espai al voltant de l'imant, que anomenem camp magnètic i que representem mitjançant línies de camp. La interacció es pot donar en forma d'atracció o de repulsió, i quan els materials ferromagnètics no es poden desplaçar, però sí rotar (com s'esdevé amb l'agulla de la brúixola), l'acció de l'imant provoca una orientació determinada d'aquests materials. Aquesta manera de raonar hauria de permetre a l'alumnat entendre que el magnetisme no és un «superpoder», i per tant, cal ser crítics davant d'usos fraudulents que a vegades es donen (com les famoses polseres equilibradores del benestar).

A més, podem construir la idea que les càrregues en moviment dins d'una espira es comporten com a imants i interactuar-hi. Això permet transformar el moviment d'imants en moviment de càrregues (com passa en els generadors elèctrics) i transformar el moviment de càrregues en moviment d'imants (com passa en els motors elèctrics). De fet, prop d'un fil conductor pel qual circula corrent elèctric, una brúixola en nota els efectes i se'n desvia l'agulla. Si el fil pel qual circula el corrent està enrotllat sobre si mateix, com més voltes tingui més gran és el camp magnètic que es crea al seu centre. Un clau (o un altre objecte de material ferromagnètic) entorn del qual s'enrotlla un fil elèctric actua com un imant quan circula el corrent pel conductor i deixa de fer-ho quan cessa el corrent. És el que s'anomena un electroimant. De la mateixa manera, quan es mou un imant cap a dins i fora d'una bobina elèctrica, s'indueix corrent elèctric a la bobina. El corrent generat és més intens com més ràpid sigui el moviment relatiu entre la bobina i l'imant i com més espiras tingui la bobina, i aquest és el principi pel qual funcionen els generadors elèctrics. Això ens porta a entendre com generem corrent elèctric aprofitant moviment (per exemple, d'un salt d'aigua, del vent, de les onades, etc.).

Amb els exemples de motor i generador elèctric, els estudiants poden comprendre que els fenòmens elèctrics i els fenòmens magnètics són indissociables: mitjançant el moviment relatiu d'un imant respecte a una bobina es crea corrent elèctric i alhora el corrent elèctric pot fer moure un imant al voltant d'una bobina o una bobina al voltant d'un imant. Comprendre aquesta relació és molt útil per poder explicar el funcionament de qualsevol aparell electromagnètic com els que hem vist al llarg de l'apartat (el generador, la dinamo, la llanterna manual), però també molts d'altres, com els frens regeneratius del cotxe elèctric. A més, aquest model hauria de ser la base per construir més endavant altres idees més complexes en el cas dels estudiants que prossegueixin l'educació postobligatòria: la força de Lorentz, la inducció magnètica d'un conductor, o la llei de Faraday-Lenz, entre d'altres.

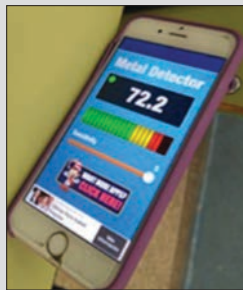
ENSENYAR MAGNETISME A TRAVÉS D'ABP

App Checkers: Quina és la fiabilitat d'un detector de metalls?

El projecte App Checkers és un projecte orientat a determinar quina és la fiabilitat de diferents aplicacions comercials, que se suposa que mesuren alguna cosa del seu entorn (sigui temperatura, radiació, sons, etc.) i que tenen algun tipus d'aplicació pràctica.

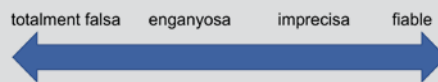
Una de les aplicacions que pot triar l'alumnat és un detector de metalls. Per posar a prova la fiabilitat d'aquest tipus d'aplicacions, l'alumnat ha de definir criteris per determinar aquest grau de fiabilitat, com ara si realment mesura el que diu que mesura, com de precises i d'estables en són les mesures, quin rang de valors pot mesurar, etc.

Per respondre a aquestes preguntes, ha de dissenyar un o diversos experiments, com ara provar de mesurar amb diferents distàncies i orientacions, fer servir diversos tipus de metalls, entre d'altres, però sempre promovent que sigui l'alumnat qui pugui pensar i executar els seus propis experiments.



1. Hem pensat que desonem el mòbil quiet, i hi anirem acostant objectes fets de diferents tipus de metall.
2. Agafarem un metall, i l'acostarem a diferents parts del mòbil, fins que descobrim quin punt detecta el metall.
3. Farem el mateix que l'opció 1), però toquant la càmera amb un ganet.

A partir dels resultats obtinguts, l'alumnat ha d'acabar fent un vídeo de verificació de l'aplicació, classificant-la segons el seu nivell de fiabilitat, on es pot fer servir una escala de fiabilitat com les que normalment es fan servir al *fact-checking* periodístic:



Per saber-ne més: López-Simó, V (2021): App Checkers. *Aula de Secundaria*.

Bibliografia clàssica de referència sobre electricitat i magnetisme:

- BLACK, D.; SOLOMON, J. (1987). Can pupils use taught analogies for electric current? *School Science Review*: 249-254
- FURIÓ-MAS, C.; GUIASOLA, J. G. (1999). Concepciones alternativas y dificultades de aprendizaje en electrostática. Selección de cuestiones elaboradas para su detección y tratamiento. *Enseñanza de las Ciencias: Revista de Investigación y Experiencias Didácticas*, 441-452.
- MCDERMOTT, L. C.; SHAFFER, P. S. (1992). Research as a guide for curriculum development. *American Journal of Physics*, 60 (11), 994-1013.
- PSILLOS, D.; KOUMARAS, P.; VALASSIADES, O. (1987). Pupils' representations of electric current before, during and after instruction on DC circuits. *Research in Science and Technological Education* 5 (2): 185-199
- SHIPSTONE, D. (1985). Chapter 3. Electricity in Simple Circuits. A: Driver, R., Guesne, E., Tiberghien, A. (eds.). *Children's ideas in science*. Milton Keynes: Open University Press.

Capítol 5. Ensenyar ones, llum i so a secundària

A l'hora de classificar les branques de la física que estudien la llum (l'òptica) i el so (l'acústica), de vegades aquestes es presenten com dues branques completament independents situades al mateix nivell que les altres grans famílies (la mecànica, l'electromagnetisme i la termodinàmica). En canvi, altres vegades es presenten com a subbranques (les radiacions dins l'electromagnetisme i el so dins la mecànica). I fins i tot podem trobar que s'agrupa llum, so i altres ones en una branca anomenada «física ondulatòria». Aquest problema també existeix en la definició dels currículums escolars, en què llum i so es poden presentar tant com un contingut independent com dins el bloc d'energia.

En el nostre cas, com presentem al capítol 1, hem optat per agrupar la versió escolar de l'òptica, de l'acústica i de la física ondulatòria en general com una gran família de models, ja que aquestes diferents aproximacions comparteixen molts elements essencials comuns (com el concepte de propagació o d'interacció so/llum amb la matèria). Així, aquesta família de models es pot estructurar al voltant de tres grans idees o idees clau:

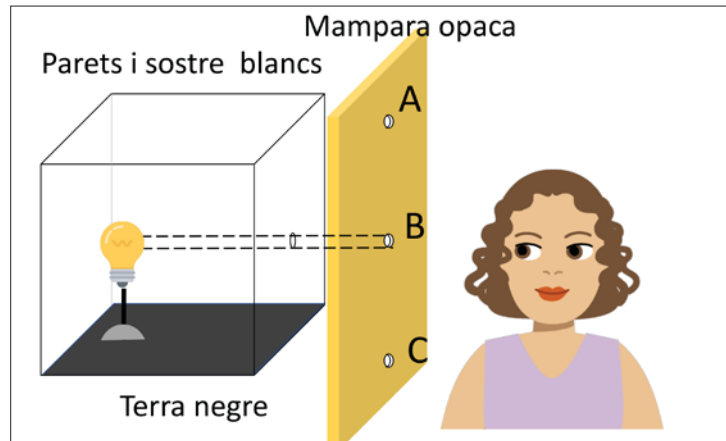
1. La idea de propagació de la llum com a raig rectilini
2. La idea de color com a interacció entre els tipus de llum i la matèria
3. La idea de so com a ona mecànica

Com deus haver observat, en el redactat d'aquestes idees ens prenem una important llicència didàctica: associar la llum amb el model de raig i el so amb el model d'ona. Evidentment, sent estrictes, hagués estat més correcte assumir que tant la llum com el so es poden explicar com a raig o com a ona (i, de fet, com a partícula, ja que en alguns casos convé usar les idees de fotó i de fonó). De fet, sovint en cursos superiors s'utilitza aquesta dualitat de possibles models explicatius sobre la llum per aprofundir en la naturalesa de la ciència i la mateixa idea de model. Introduir ambdós models per abordar els fenòmens lluminosos i acústics, però, implica incorporar idees complexes llunyanes del que seria una primera versió de la construcció d'uns models operatius i útils/funcionals per a l'alumnat per explicar el que observen. Per aportar una mica més de matís, al llarg del capítol discutirem breument els pros i els contres d'usar cada tipus de model per explicar la llum i el so.

5.1. La idea de propagació de la llum com a raig rectilini

Abans de començar... Posa a prova les teves idees

Imagina que tens un muntatge com el de la figura següent. Hi ha una bombeta dins d'una caixa amb parets blanques i el terra és de color fosc. La caixa té una ranura circular d'1 cm de diàmetre. A un pam de la caixa, paral·lel a la paret amb la ranura, hi ha una mampara, aquesta vegada amb tres orificis com els de la imatge següent. Si es traça una línia recta des de la bombeta fins a l'orifici de la caixa, aquesta coincideix amb l'orifici B de la mampara.

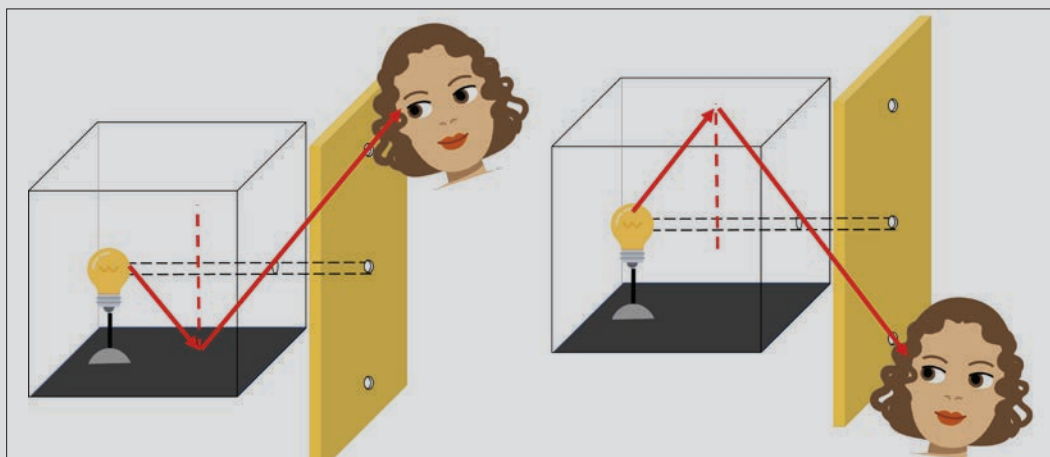


1. Què es veurà per l'orifici B?
2. Què es veurà per l'orifici A?
3. Què es veurà per l'orifici C?

Llegiu-ho després d'haver respost individualment

En preguntar què es veurà per l'orifici B, els estudiants solen afirmar que es veurà la llum de la bombeta. Fins aquí tot correcte. El problema és que en preguntar què es veurà pels orificis A i C la resposta més comuna i intuïtiva serà que «es veurà el mateix però amb menys llum».

No obstant això, aplicant el model de raig, la resposta és que per l'orifici A, a l'altra banda de la ranura de la capsa simplement es veurà el terra fosc, ja que si es traça una línia recta entre l'orifici A de la mampara i la ranura de la capsa, els únics raigs que hi passarien són els que provenen del terra de la capsa. De la mateixa manera, en mirar per l'orifici C cap a la ranura de la capsa, es veurà el sostre de color blanc, ja que hi arribaran els raigs provinents de la bombeta que s'hagin reflectit al sostre de la capsa.



5.1.1. El punt de partida de l'alumnat sobre la idea de raig de llum

Tal com s'esdevé amb les interaccions mecàniques o elèctriques, la llum i els fenòmens lumínics acompanyen les persones des de la primera infància. Els nens i nenes juguen amb les seves ombres, els agrada fer servir llanternes en llocs foscos i observar com es projecta la llum, juguen a encendre i apagar els interruptors, etc. En les seves interaccions amb el món natural, en algun moment o altre han vist un arc de Sant Martí, han observat els feixos de llum que travessen els núvols, o han vist com alguns objectes deixen passar millor la llum que d'altres. De manera espontània, totes les persones construïm explicacions davant d'aquests fets, que no sempre van en la línia de les explicacions que la ciència ha construït. La recerca en didàctica de la física ha identificat i caracteritzat algunes d'aquestes idees, que resumim a continuació.

a. La idea que per veure-hi cal emetre raigs de visió

Encara que per algú expert en física li sembli obvi que «veure» significa «que la llum que prové d'un objecte entri als nostres ulls», aquesta afirmació no resulta tan evident per a molts estudiants, que pensen que les persones són capaces de veure objectes perquè els miren activament o perquè alguna cosa surt dels seus ulls i viatja fins a l'objecte. Segons alguns autors de didàctica de la física, aquest raonament coincideix amb l'explicació sobre la visió que es creia a l'antiga Grècia. L'any 500 aC Pitàgores descrivia la visió com una llum que emanava de l'ull en forma de raigs lluminosos que es propaguen en línia recta formant cons, que aquesta emanació xocava amb els cossos i la visió era el resultat d'aquest xoc.

Aquesta explicació alternativa sobre la visió disposa de diferents variants. A més dels «raigs de visió» que surten dels ulls, alguns estudiants expliquen o dibuixen el procés de visió afegint-hi raigs que van de la font de llum a l'objecte. És a dir, consideren que per veure un objecte cal una llum per il·luminar o «banyar» l'objecte, però sense la necessitat que la llum hagi de viatjar després des de l'objecte fins als ulls.

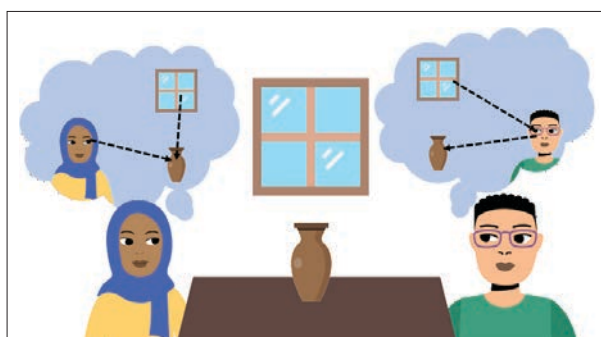


Figura 5.1. Representació dels raigs basada en una idea alternativa de visió. Adaptada d'Osuna *et al.* (2007).

b. La confusió entre raig de llum i feix de llum

Els raigs de llum, com a construcció ideal que representa el camí de la llum, no es poden veure. Ara bé, en algunes situacions quotidianes sembla que veiem els raigs de llum, com s'esdevé amb els «raigs del Sol» que de vegades es veuen entre els núvols, o els «raigs làser».

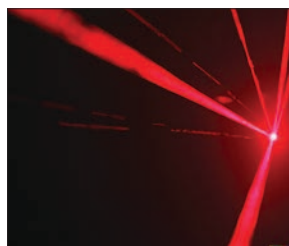
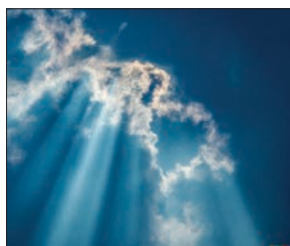


Figura 5.2. Situacions en la vida quotidiana en què veiem zones de l'espai il·luminades per un feix de llum, i que associem erròniament al concepte de raig de llum. Veure la imatge en color a la versió digital del llibre. Font: Elaboració pròpia amb DallE2.

En realitat, això parteix d'una confusió important, ja que s'està fent servir el terme «raig» amb dos significats diferents:

1. D'una banda, parlem dels raigs com a constructe o model de la ciència: un raig és la representació lineal que utilitzem per predir i explicar com es propaga la llum des de l'objecte emissor fins als nostres ulls.
2. De l'altra, hi ha el que es veu en aquestes imatges, que és un feix de llum. Aquest feix el veiem perquè allà per on passa una certa quantitat de llum ben col·limada hi ha partícules en suspensió a l'aire. Quan aquestes partícules s'il·luminen per una llum intensa i col·limada en una direcció, la zona on les partícules s'il·luminen coincideix amb la trajectòria que està seguint la llum, per la qual cosa visualment genera una imatge que col·loquialment anomenem «raig» de llum. Però evidentment, per poder estar veient aquestes partícules il·luminades, els raigs que ens arriben i veiem no són els que segueixen la trajectòria il·luminada, sinó els que surten reflectits de les partícules en suspensió que es troben en aquesta trajectòria i arriben als nostres ulls.

Aquesta confusió és el que passa en l'exemple que usàvem a l'inici de l'apartat, amb la idea que en les ranures A i C de la mampara es veuria «menys llum», ja que s'està assumint que el que es veu és la llum, i no els objectes que reflecteixen la llum que ens arriba als nostres ulls. El problema d'aquesta confusió és que és molt comú fins i tot en els materials educatius, on el que veiem són superfícies il·luminades per un feix de llum que s'utilitzen per explicar com es mou la llum en línia recta, però on s'obvia que podem veure-ho perquè la llum es reflecteix a les superfícies, i per tant, justament els raigs que segueixen la trajectòria del feix de llum a la imatge són els que no veiem. Per exemple, no podem veure la trajectòria d'una llum làser al buit.

c. La idea que un raig de llum pot tapar un altre raig de llum

Un altre error comú identificat en molts estudiants el trobem quan se'ls pregunta, per exemple, com és que les coses que emeten llum pròpia (com ara una llanterna) es veuen «millor» de nit que de dia. Aquí una resposta molt comuna és que la llum del sol «tapa» la llum de la llanterna, en comptes d'explicar-ho en termes de lluminositat relativa i superposició de raigs de llum. En altres casos, fins i tot trobem que les respostes de l'alumnat és que hi ha objectes que brillen o il·luminen «millor» de nit que de dia, com si el que canviés entre el dia i la nit fos la propietat d'emetre llum dels objectes, i no la interacció dels nostres ulls amb diferents fonts lumíniques.

d. Confusió respecte de la idea de reflexió

La reflexió de la llum i els miralls tenen la seva pròpia família d'idees alternatives. En primer lloc, hi ha confusió entre reflexió i mirall, evidenciada en la idea que només els miralls (o de vegades també els objectes brillants i lluents) tenen la capacitat de reflectir la llum, mentre que els objectes rugosos o mat no ho fan. Per explicar per què podem veure objectes que no reflecteixen llum, la resposta sol ser «la llum es queda a la superfície d'aquests objectes».

La formació d'imatges en un mirall comporta, també, confusions importants. Alguns estudiants afirmen que com més gran és un mirall més gran és la imatge, o bé se sorprenden quan es pot veure un objecte a través d'un mirall encara que hi hagi un segon objecte opac entre el primer objecte i el mirall. De fet, en els darrers anys s'han viralitzat a través de les xarxes socials alguns vídeos en què uns joves es pregunten com pot ser que un mirall «sàpiga» que hi ha un objecte darrere d'un llibre o un full, com es mostra en aquesta imatge.

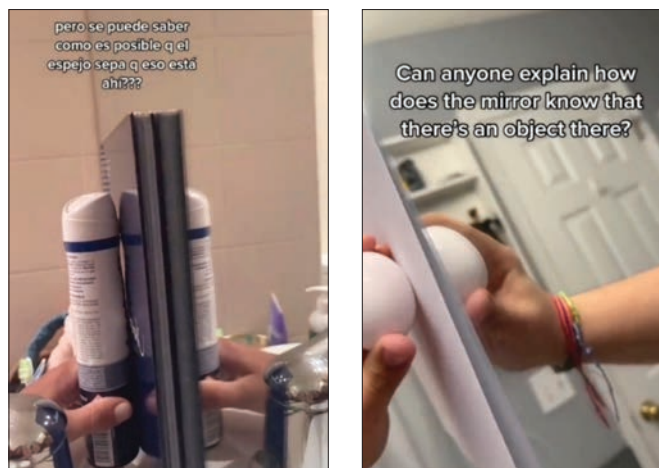


Figura 5.3. Exemples de vídeos viralitzats durant el 2023 preguntant-se com pot ser que un mirall reflecteixi la imatge d'un objecte que, suposadament, està amagat darrere d'un llibre o un full de paper.

Font: imatges obtingudes per usuaris de xarxes socials.

5.1.2. Com ajudem a construir un model de llum com a raig?

Perquè l'alumne pugui construir un model de raig de llum que li permeti predir i explicar el camí de la llum i on es formen imatges, serà convenient començar diferenciant clarament entre el concepte d'emissor de llum i de reflector de llum. Malgrat que possiblement l'alumnat hagi abordat aquest concepte a primària, es pot plantejar que expliquin, per exemple, la diferència entre la llum que ens arriba del Sol i de la Lluna. Podem enfrontar l'alumnat a situacions que promoguin l'elaboració d'un dibuix de la trajectòria que segueixen els raigs, plantejant preguntes de complexitat creixent. Serà important fer que explicitin les seves idees prèvies amb situacions senzilles com les que discutim a la figura 5.1 (un simple objecte il·luminat pel Sol que entra per la finestra, o bé il·luminat per una llum artificial). Més endavant, es poden plantejar reptes de més complexitat: amb un mirall rectilini, o amb un de corbat... Una simple cullera metàl·lica ofereix la possibilitat d'experimentar amb miralls còncaus i convexos i veure si el que hi veiem (imatge estirada, imatge invertida...) coincideix amb el camí dels raigs. Convé usar situacions que es puguin representar en 2D (és a dir, on la font emissora, l'objecte il·luminat i el nostre ull es trobin en un mateix pla), per evitar afegir més dificultats al raonament.



Figura 5.4. Una cullera metàl·lica pot esdevenir un bon context per pensar en el comportament dels raigs de llum, ja que la imatge que veiem en els dos costats és completament diferent. Font: elaboració pròpia.

Amb aquestes activitats, no cal arribar a una representació formal de l'òptica geomètrica com la que es fa al batxillerat (amb distància focal, objecte i imatge), sinó simplement que es compleixin algunes regles de joc, que seran les que configuraran el model de raig:

1. El camí de la llum sempre ha de començar en un focus emissor, és a dir, un objecte que emet llum i té, per tant, capacitat d'il·luminar-ne d'altres: una bombeta, un llum làser, la llum solar (directa o difractada a l'atmosfera, una flama, etc.). Sense focus emissor no hi ha llum.
2. Per poder veure un objecte, ha d'arribar un raig de llum en línia recta des de l'objecte fins als nostres ulls (o a un altre sensor de llum com ara una càmera que enregistri la imatge). Qualsevol altre raig que no acabi als nostres ulls/càmera no el veiem, encara que passi a prop o per davant dels nostres ulls.
3. Durant el camí, la llum s'ha pogut desviar per reflexió en una superfície o bé per refracció en un canvi de mitjà. Aquests desviaments no són qualssevol: segueixen unes certes direccions que depenen de la direcció original de la llum i de propietats del material en el camí de la llum. Quan la llum que ens arriba és fruit d'un fenomen de reflexió no especular (reflexió en totes direccions o difusa) o de refracció, la imatge que observem no correspon a la posició real de l'objecte que emet la llum.

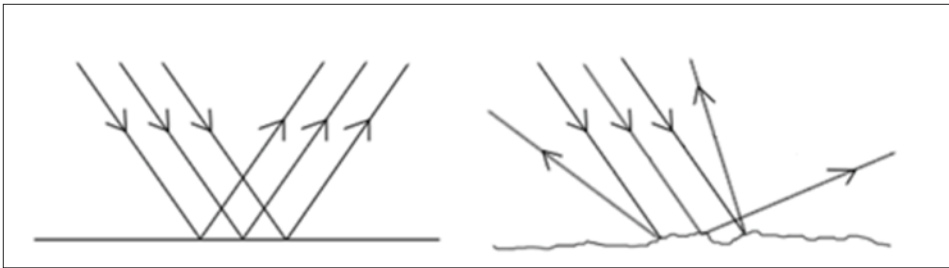


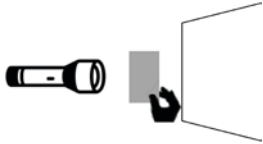
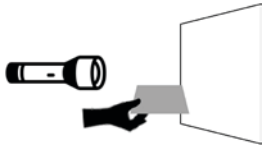
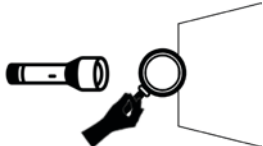
Figura 5.5 Representació de la diferència entre la reflexió especular (esquerra) i difusa (dreta).
Font: elaboració pròpia.

Prova-ho a l'aula

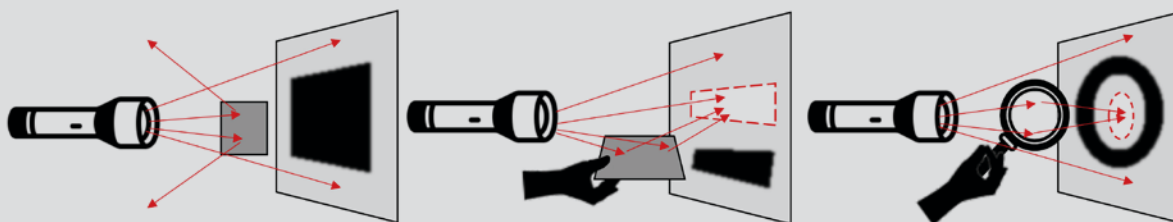
Llums i ombres (en parelles)

Disposeu d'un petit mirall i d'una lupa que cal posar entre una font de llum (podeu fer servir la llanterna del mòbil) i una superfície blanca (podeu fer servir un full en vertical).

1. Abans de res, feu la predicció de què creieu que es veurà en cada cas (primera columna).
2. Un cop dibuixades les prediccions, tanqueu els llums de l'aula i obriu la font de llum. Dibuixeu el que hi veieu i identifiqueu-hi semblances i diferències (segona columna).
3. Representeu la trajectòria dels raigs de llum des que surten de la font de llum fins que arriben (si arriben) a la superfície. Identifiqueu a quines zones de la superfície no arriben raigs.

	Què crec que es veurà a la superfície?	Què hi veig? (dibuix de la imatge projectada)	Com ho puc explicar? (representa raigs de llum)
Mirall perpendicular 			
Mirall paral·lel 			
Lupa 			

Aquesta activitat permet abordar de manera qualitativa el comportament de la llum, connectant el que veiem (la imatge que es forma sobre la superfície) amb la trajectòria dels raigs que surten de la font. En el cas dels miralls, aquests reflecteixen els raigs que hi incideixen, creant zones d'ombra (allà on no arriben els raigs) i zones sobreil·luminades (on arriben alhora els raigs directament de la font i els raigs reflectits als miralls), de manera que en el cas del mirall paral·lel tindriem sobre la pantalla tres zones d'il·luminació diferent. En el cas de la lupa, en corbar la trajectòria dels raigs crea una zona sobreil·luminada al mig i una zona fosca al voltant, ja que concentra els raigs en aquest punt central. Això ens pot servir per entendre què fan les lupes amb la llum.



5.1.3. A quina versió de la idea de raig de llum volem arribar i per a què?

Al final de l'escolaritat, un estudiant hauria de ser capaç d'explicar amb el model de raig la propagació en línia recta de la llum que surt d'un emissor, que pot canviar de direcció en canviar de medi, i que només detectarem si arriba a un sensor, és a dir, veurem si els raigs de llum arriben als nostres ulls. Això hauria de permetre una base sòlida per elaborar explicacions d'òptica geomètrica com les usades per al funcionament d'una càmera fotogràfica, un projector d'ordinador o del mateix ull humà. També respecte de l'ús de lents com les ulleres que ajustem quan hi ha problemes de visió o l'alteració de la nostra pròpia lent (cristal·lí) que suposen les lentilles o les operacions de cirurgia refractiva. Aquests fenòmens els podran aprofundir aquells estudiants que sí que prossegueixin l'escolaritat.



Figura 5.6. Dues explicacions anàlogues de per què una superfície pot reflectir la imatge d'un objecte malgrat no estar just al davant: l'exemple de l'objecte amagat darrere d'un objecte opac que s'ha viralitzat a les xarxes socials i la reflexió de les muntanyes sobre l'aigua. Font: elaboració pròpia.

A més, el model de raigs serveix per explicar com es propaguen altres radiacions més enllà de la llum visible, incloent-hi tot l'espectre electromagnètic. Dominar aquest model permet tant detectar algunes aplicacions falses com l'existència d'una càmera de raigs X al mòbil com desmentir *fake news* com ara que els termòmetres infrarojos emeten radiació.






Figura 5.7. Dues situacions que es poden trobar a la xarxa que es basen en idees alternatives sobre el model de raig: un anunci d'una aplicació que suposadament hi «veu» en raigs X, i un missatge que es va viralitzar el 2020 en què s'alertava del perill dels termòmetres IR utilitzats durant la pandèmia de COVID-19. En tots dos casos, s'està confonent (sigui deliberadament o no) el concepte d'emissor i de receptor del raig.

Font: imatges obtingudes per usuaris de xarxes socials.

El racó de pensar

Llum com a raig, ona o fotó? Pros i contres

La llum és un fenomen físic complex la comprensió total del qual requereix l'ús de diferents models compatibles entre si: com a raig, com a ona i com a partícula o fotó. Cada model té els seus avantatges i inconvenients i la tria depèn dels fenòmens físics que es vulguin abordar a l'aula.

	<p>El model de raigs de llum és útil per predir i explicar la propagació rectilínia de la llum, la necessitat d'un emissor de llum i d'un detector, i la formació d'imatges en òptica geomètrica.</p>
	<p>El model d'ona de llum és adequat per a fenòmens com ara la difracció, la interferència i la polarització de la llum, com també per explicar els diferents tipus de llum com ara els colors i l'ordenació dels tipus de llum (IR, visible, UV, etc.) d'acord amb l'espectre electromagnètic.</p>
	<p>El model de fotó de llum és necessari per explicar l'efecte fotoelèctric i altres fenòmens relacionats amb la naturalesa corpuscular de la llum, com ara l'espectre d'emissió de cada àtom.</p>

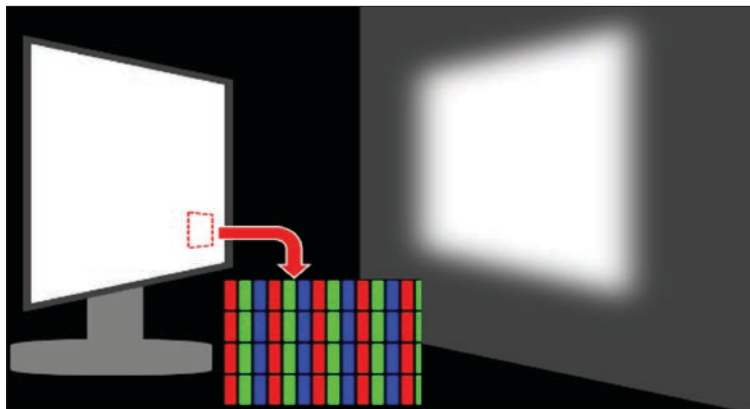
Al nostre parer, aquests tres models impliquen una certa progressió en les idees. Nosaltres hem optat per centrar l'educació secundària obligatòria en l'explicació de la llum com a raig, ja que és més coherent amb la física que l'alumnat ha vist a primària (les ombres, la direcció dels raigs del sol al llarg del dia, etc.). Això no obstant, limitar-nos al model de raig suposarà una petita dificultat a l'hora d'explicar la interacció llum-matèria, com veurem a l'apartat següent, ja que sense entrar en la naturalesa ondulatòria de la llum, el concepte d'espectre electromagnètic que permet ordenar els colors de menys a més energètic serà una mena de «caixa negra» amb la qual haurèm de bregar.

L'alumnat que continuï estudiant física postobligatòria sí que aprendrà sobre la naturalesa ondulatòria i corpuscular de la llum, ja que aquests models seran imprescindibles per explicar fenòmens físics propis dels cursos superiors.

5.2. La idea de color com a interacció entre els tipus de llum i la matèria

Abans de començar... Posa a prova les teves idees

Les pantalles generen llums de diferents colors a partir dels seus píxels. Normalment els píxels de les pantalles es poden il·luminar amb els colors primaris de la síntesi additiva de la llum: vermell, verd i blau. Veure la imatge en color a la versió digital del llibre.



Suposa que dins d'una habitació a les fosques hi ha una pantalla de llum feta amb píxels, que, al seu torn, té al davant una paret de color blanc (és a dir, que quan rep la llum solar es veu blanca). Suposa que l'habitació està totalment a les fosques, i la paret només rep la il·luminació de la pantalla.

1. De quin color es veurà la paret si a la pantalla només s'encenen els píxels de color vermell i verd?
2. De quin color es veurà la paret si, a més, entre la pantalla i la paret es col·loca un filtre de llum vermella?
3. De quin color es veurà la paret si, a més, se la il·lumina amb una segona font de llum de color verd?

Llegiu-ho després d'haver respost individualment

Quan es pregunta a l'alumnat per situacions en què hi ha fenòmens lumínics amb color, sobretot quan és la primera vegada que s'hi enfronta, l'alumnat sol sentir-se bloquejat davant d'aquestes preguntes, i en intentar respondre de manera intuïtiva, sovint apareix la confusió entre el concepte d'addició (associada a la llum) i de subtracció del color (associada al pigment).

En preguntar què passarà en el primer cas, possiblement l'alumnat tracti de raonar quin color és el resultat de barrejar «vermell» i «verd». Si alguna vegada ha barrejat pigments, la barreja de verd i vermell dona un color marronós. Ara bé, aquí no s'estan barrejant pigments, sinó raigs de llums de colors diferents, i per tant, no serveix raonar en termes de subtracció sinó d'addició. I tot que sembli poc intuïtiu, l'addició del verd i el vermell genera llum de color groga!

Si a aquesta llum groga li posem un filtre vermell estem dient que aquest filtre absorbirà qualsevol llum diferent de la vermella, pel qual cosa la paret es veurà vermella. Si a aquesta llum se li afegeix llum verda, igual que en el primer cas, es tornarà a veure la paret groga.

5.2.1. El punt de partida de l'alumnat sobre la idea de color i de la interacció llum-matèria

Els infants estan envoltats de llum i colors en la seva vida quotidiana, tant els que s'observen en els fenòmens naturals com els generats per pantalles o altres fonts lluminoses. A l'escola primària l'alumnat aprèn a distingir entre materials transparents, translúcids i opacs, i acostumen a jugar amb ombres, filtres, lents i prismes que difracten la llum, etc. La recerca en didàctica ha analitzat quins tipus de raonaments i explicacions fa l'alumnat envers el color i la interacció de la llum i la matèria, i ha identificat algunes de les dificultats que resumim a continuació.

a. El color i la transparència com a propietats en comptes de com a interaccions

És habitual que els estudiants assignin color als objectes com si el color fos una propietat d'aquests, ni tan sols de les seves pintures o pigments. En cas que la pintura o pigment fossin els responsables del color dels objectes que veiem, la il·luminació no seria tan important.

Molts estudiants consideren, per exemple, que quan la llum passa a través d'un filtre de color, el filtre el que fa és afegir el color a la llum. També consideren que quan la llum d'un color determinat il·lumina un objecte que sota la llum blanca veiem d'un altre color, aquests dos colors (el de la llum i el de l'objecte) es barregen, en comptes de pensar en termes de quins colors s'absorbeixen i quins es reflecteixen. Per exemple, suposem que tenim un objecte que amb llum visible veiem de color blau fosc, i l'il·luminem amb llum verda. En preguntar de quin color veurem l'objecte, és comú trobar respostes que diuen que es veurà d'una barreja de verd i blau (és a dir, un color turquesa), o bé d'un color cian (ja que la llum verda i blava combinada genera aquest color). No obstant això, el que passa realment és que l'objecte es veurà negre, ja que el color blau fosc de l'objecte indica que absorbeix tots els colors menys el blau, i per tant, absorbeix la totalitat de la llum verda que rep, sense reflectir-ne cap part.

b. El color associat a una única longitud d'ona

A l'alumnat, al llarg de l'educació secundària, en algun moment se li explica el concepte d'espectre de radiacions electromagnètiques, segons el qual hi ha una equivalència entre el color de la llum i propietats intrínseques d'aquesta. Generalment parlem de la longitud d'ona associada a cada llum, en què les longituds d'ona més curtes són les més energètiques, i a la llum visible coincideixen amb els violetes (i els encara més energètics són els ultraviolats). Els de longituds d'ona més llargues són les menys energètiques, i coincideixen amb els vermells (de manera que per sota quedarien les llums infraroges).

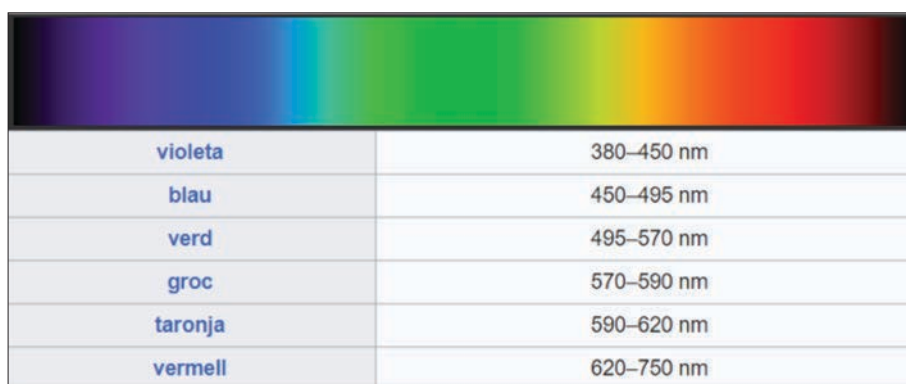


Figura 5.8. Equivalència entre color i longitud d'ona de la radiació electromagnètica. Permet entendre el continu de colors a la llum visible i que hi continua havent llum quan aquesta deixa de ser visible als nostres ulls. Veure la imatge en color a la versió digital del llibre. Font: Viquipèdia.

El problema d'aquesta equivalència és que no és unidireccional: cada longitud d'ona equival a un color, però, en canvi, no podem dir que cada color equivalgui a una freqüència. Per exemple, si tenim una llum que emet radiació de $\lambda = 580$ nm, aquesta es veurà sempre de color groc. Ara bé, si veiem una llum de color groc, no podem afirmar que hi hagi una font emetent radiació a $\lambda = 580$ nm. Per exemple, la llum groga pot ser el resultat de l'emissió d'una llum verda de $\lambda = 500$ nm i una altra de vermella de $\lambda = 720$ nm, de manera que combinades generin llum groga. A nivell teòric, aquest fet es pot explicar amb la idea de superposició d'ones de diferent freqüència, però cal tenir en compte que això s'aborda en cursos més avançats, i que queda fora del que es pot explicar en els cursos d'educació obligatòria.

c. Confusions respecte de l'efecte d'hivernacle

Més enllà de la llum visible, una de les confusions més importants entre l'absorció i la reflexió de la llum la trobem en les explicacions de l'efecte d'hivernacle que provoca l'escalfament global. En moltes explicacions que podem trobar en llibres de text, en tutorials a YouTube i en tota mena de materials didàctics s'explica que la llum visible que il·lumina i escalfa la superfície de la Terra genera al seu torn una radiació infraroja, i que els gasos d'efecte d'hivernacle com el CO_2 en dificulten l'escapament. Ara bé, per fer aquesta explicació, es planteja l'existència d'una mena de capa reflectant que evita l'escapament d'aquests raigs infrarojos. Aquesta explicació és especialment inapropiada tenint en compte que ja hi ha moltes confusions entre l'efecte d'hivernacle i la capa d'ozó (que són dos fenòmens atmosfèrics força independents l'un de l'altre).

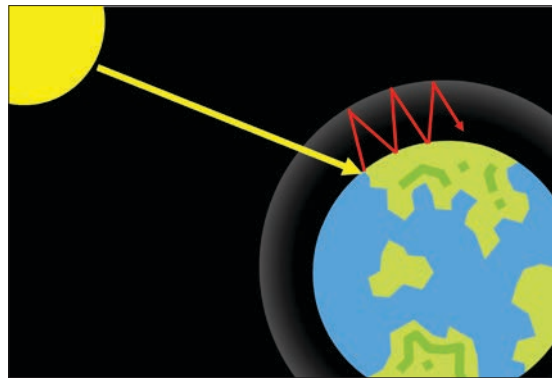


Figura 5.9. Explicació errònia molt comuna sobre el canvi climàtic que apareix en molts materials educatius, segons el qual hi ha una capa reflectora a una certa altura de l'atmosfera, que fa que la llum infraroja es quedi «rebotant» dins l'atmosfera. Veure la imatge en color a la versió digital del llibre. Font: elaboració pròpia.

5.2.2. Com ajudem a construir una idea de color i d'interacció?

Una manera divertida de començar a d'aprendre sobre la llum és jugar a fer llums i ombres de colors. Es pot utilitzar una font de llum i diversos filtres de colors per crear ombres de diferents colors. Això ajuda els estudiants a comprendre la síntesi additiva, en què els colors es combinen per crear un color més clar i brillant. Això portarà a la necessitat de distingir entre la síntesi additiva i la substractiva, entenent que, mentre que en la síntesi additiva els colors es combinen per crear colors més brillants, en la substractiva, la barreja de colors fa crear colors més foscos.

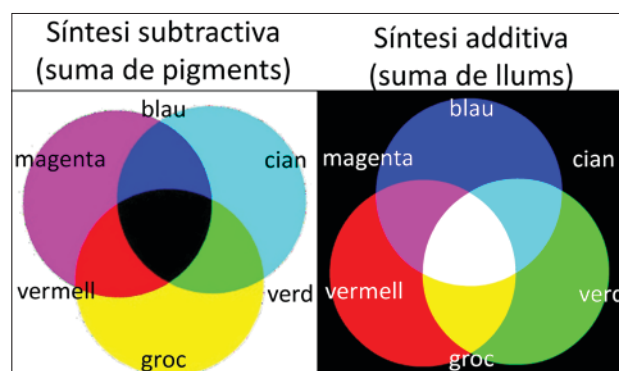


Figura 5.10. Diagrames de la síntesi substractiva i additiva de colors. En el primer cas, l'absència de pigments equival al blanc, i la síntesi de tots els pigments, al negre. En el segon cas, l'absència de llums equival al negre, i la suma de totes les llums, al blanc. Veure la imatge en color a la versió digital del llibre.

Una activitat molt senzilla que pot ajudar a fer veure tant que les diferents llums porten diferents energies com el fet que els colors més foscos són els que absorbeixen més llum (i en reflecteixen menys) consisteix a il·luminar globus de diferents colors amb una lupa que concentri els raigs solars. L'alumnat podrà veure que els globus més foscos exploten abans que els que tenen colors més clars. A més, es pot jugar a combinar diferents colors i filtres col·locats sobre la lupa, de manera que puguem observar que si il·luminem un globus d'un color amb llum d'aquell color (la que reflecteix) aquest no es rebenta.



Figura 5.11. Comparació de l'efecte d'un feix de llum concentrat amb una lupa sobre globus de diferents colors, en què es pot observar que els globus més foscos exploten abans, ja que absorbeixen més llum. Font: elaboració pròpia.

A més, es poden aplicar aquests conceptes a situacions complexes en què hi hagi diverses combinacions d'addició i subtracció de llum mitjançant simulacions virtuals. Això permet als estudiants experimentar amb diferents situacions i entendre les interaccions de la llum en un entorn controlat.

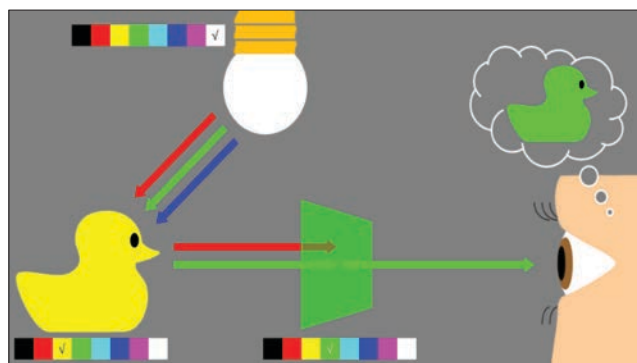


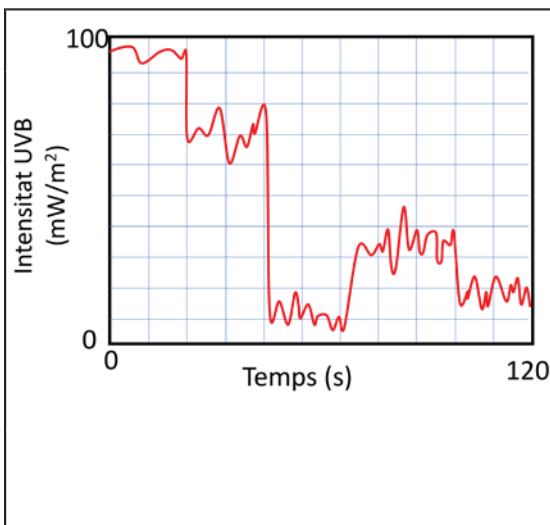
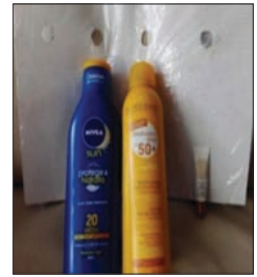
Figura 5.12. Simulació virtual que permet canviar el color de la llum, de l'objecte i del filtre per explorar com es veuria l'objecte en cada cas. Veure la imatge en color a la versió digital del llibre. Font: Javalab.org.

Finalment, es pot experimentar amb altres llums no visibles, com la llum infraroja i ultraviolada. Es poden utilitzar filtres especials i sensors per detectar la llum i comprendre'n l'emissió i absorció. Això també ajuda els estudiants a entendre com la llum és important en altres àrees de la física i de la química.

Prova-ho a l'aula

Les crem(ad)es solars (en grup)

Disposes d'un sensor de radiació ultraviolada o UV-B, que mesura la intensitat de la radiació UV en mW/m^2 i representa el valor d'aquesta radiació en funció del temps. Un grup d'estudiants han fet un experiment (real) durant dos minuts, i han mesurat la intensitat de radiació solar que arriba al sensor en cinc situacions:



Temps	Mesura
Del 0 als 20 s	Sense cap filtre entre la llum del sol i el sensor UV
Dels 20 als 40 s	Posant paper film entre la llum del sol i el sensor UV
Dels 40 als 60 s	Paper film i crema solar concentrada SFP 50 entre la llum del sol i el sensor UV
Dels 60 als 90 s	Paper film i crema solar hidratant SFP 20 entre la llum del sol i el sensor UV
Dels 90 als 120 s	Paper film i esprai solar SFP 50+ entre la llum del sol i el sensor UV

A partir de la gràfica obtinguda, completa la taula:

	Intensitat mínima	Intensitat màxima	Intensitat mitjana
Crema solar concentrada SFP 50			
Crema solar hidratant SFP 20			
Esprai solar SFP 50+			

Quin filtre solar dels utilitzats a l'experiment resulta ser el més eficaç? Justifiqueu la resposta

.....

.....

Amb aquesta activitat, que s'inclou a la unitat didàctica «Les crem(ad)es solars» del grup DIATIC, l'alumnat ha d'interpretar una gràfica d'intensitat UV en funció del temps, en què es mesura la quantitat de llum UV que travessa cadascun dels orificis d'una cartolina on s'ha aplicat diferents tipus de crema solar. Aquesta activitat està originàriament dissenyada per tal que sigui l'alumnat qui prepari el material i, fent servir un sensor d'intensitat UVB, mesuri a temps real la quantitat de radiació que travessa en cada cas. Amb aquesta activitat, l'alumnat pot relacionar experimentalment el factor que posa a l'etiquetatge (en aquest cas, factor 20 i factor 50), i observar que les cremes amb factors més alts veritablement deixen passar menys radiació.

5.2.3. A quina versió de la idea de color i d'interacció llum-matèria volem arribar i per a què?

A l'apartat anterior havíem definit algunes «regles del joc» bàsiques que, entenent la llum com a raig, permeten explicar-ne principalment la propagació en línia recta i la reflexió en una superfície. Amb això podem explicar la visió humana i el comportament dels miralls. Ara bé, aquest primer model de raig no permetia explicar per què veiem objectes de diferent color, per què hi ha objectes transparents a la llum visible, per què hi ha cremes solars que protegeixen millor que altres de la llum UV, etc.

Una versió més sofisticada d'aquest model de raig implica afegir-hi dos elements clau. D'una banda, pensar no només en el canvi de direcció de la llum que es reflecteix i/o travessa en canviar de medi, sinó també en l'absorció que es produeix dins de cada medi (i que, com veurem en el capítol següent, acostuma a relacionar-se amb l'increment de vibració de les partícules que constitueixen el material, ja que absorbeixen energia). D'aquesta manera, la llum interacciona amb el medi que travessa, i la llum transmesa a través d'un medi és el conjunt de llum que no s'ha reflectit en entrar en el medi ni tampoc s'ha absorbit.

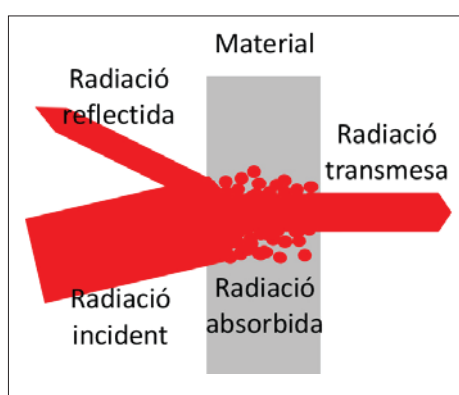


Figura 5.13. Diagrama de l'energia associada a la radiació incident, reflectida, absorbida i transmesa. Adaptat d'Hernández, Couso i Pintó (2012).

D'altra banda, implica pensar que aquests diferents tipus d'interacció llum-matèria no només depenen de les propietats de cada material, sinó també de cada «tipus» de llum, atès que la llum es pot classificar i ordenar en un espectre de menys a més energètica. Dins de la llum visible, la de color vermell és la que transporta menys energia, i la violeta la que més. Alhora, hi ha llums que les persones no podem veure, però que es comporten igual: la llum IR (encara menys energètica que la vermella) i la llum UV (encara més energètica que la violeta), com també altres radiacions encara més allunyades de l'espectre. Cada tipus de llum interactua diferent amb cada material segons la composició que té, de manera que hi ha materials que reflecteixen, absorbeixen i transmeten diferents tipus de llum. Pensem, per exemple, en com interaccionen els diferents tipus de llum davant d'un vidre:

- Si tenim un vidre «transparent» (com els que posem a les finestres), aquest deixa passar tota la llum visible i part de la llum UV, però, en canvi, reflecteix la llum IR, cosa que permet explicar l'escalfament dels hivernacles perquè la llum IR que emeten els objectes de dins en ser il·luminats no en pot sortir.
- Si tenim un vidre de mirall, al qual se li ha afegit una capa reflectant, reflectirà tota la llum incident (visible, IR i UV), sense pràcticament absorbir-ne ni transmetre'n.
- Si tenim un vidre amb un filtre absorbent de color blau (com els que trobem en un vitrall gòtic), voldrà dir que absorbeix els colors grocs, de manera que si li arriba llum blanca, deixarà passar els colors magenta i cian, que combinats fan blau.
- Si tenim un vidre amb un filtre reflectant de color blau (com el que es posen a les ulleres per reduir la llum incident blava, la més energètica i, per tant, perjudicial per als ulls) voldrà dir que reflecteix part dels colors blaus que componen la llum visible, deixant passar els grocs. Això vol dir que si mirem

a través de les ulleres ho veurem tot amb un lleugerament groguenc, però, si mirem algú de cara que porta aquestes ulleres, veurem en els vidres alguns reflexos blaus i violetes.

A més, el model que proposem permet no només explicar la interacció de la llum i els materials sòlids, sinó també els fluids, cosa que resulta especialment interessant per entendre la interacció que les diferents llums fan amb els gasos de l'atmosfera. A la imatge següent es mostra un exemple de diagrama elaborat per una estudiant de tercer d'ESO (15 anys) en què, després d'haver seguit un ABP sobre la llum i l'atmosfera, explica tant el fenomen de la capa d'ozó com el de l'efecte d'hivernacle en termes de transmissió, reflexió i absorció de les llums visibles, IR i UV, així com la idea de reemissió de la llum IR a la superfície de la Terra després d'haver absorbit la llum visible, amb la qual cosa se superen algunes de les confusions que hem discutit sobre radiació i escalfament global.

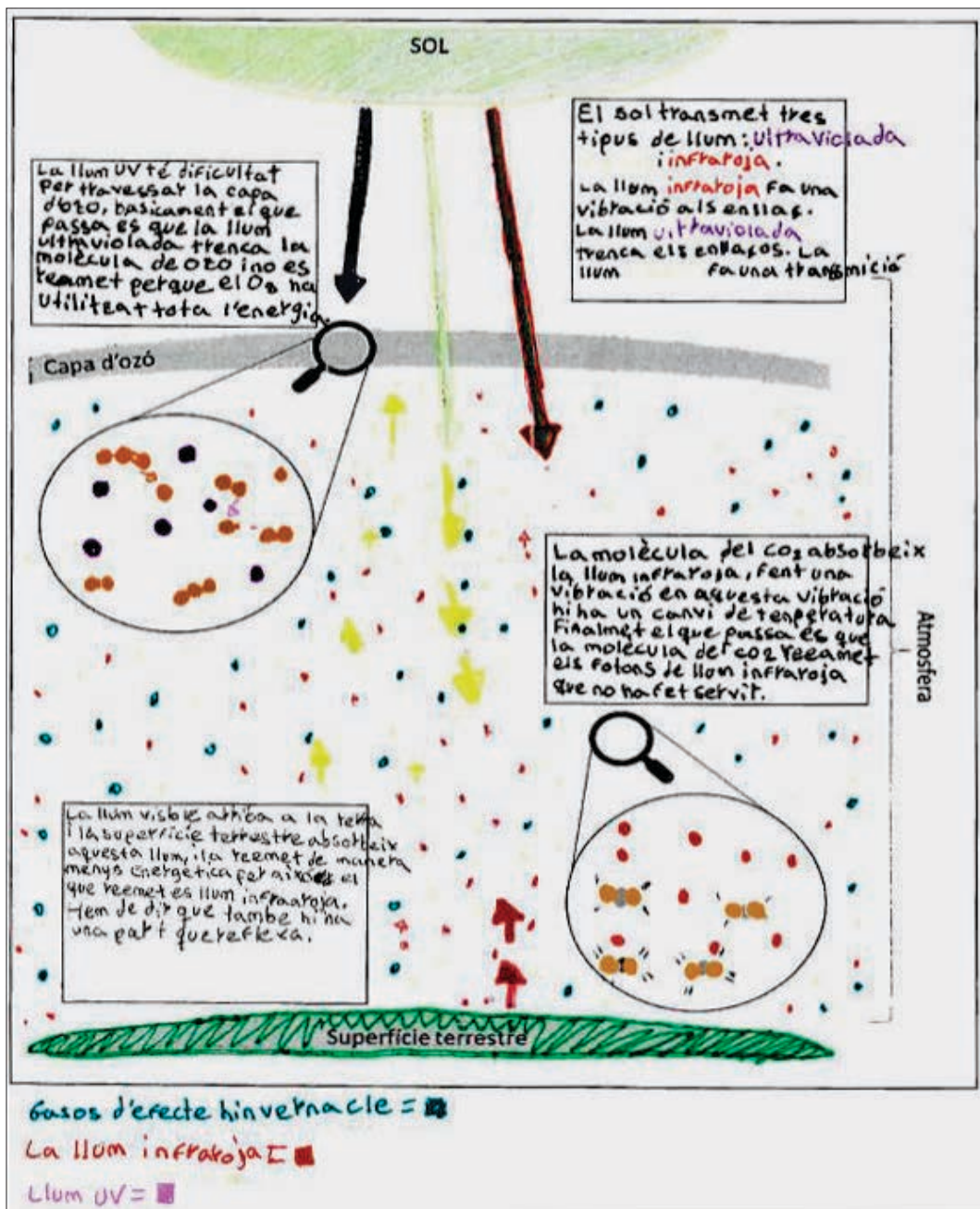


Figura 5.14. Representació de la interacció llum-matèria elaborada per una estudiant de 15 anys. Font: Parejo, (2022).

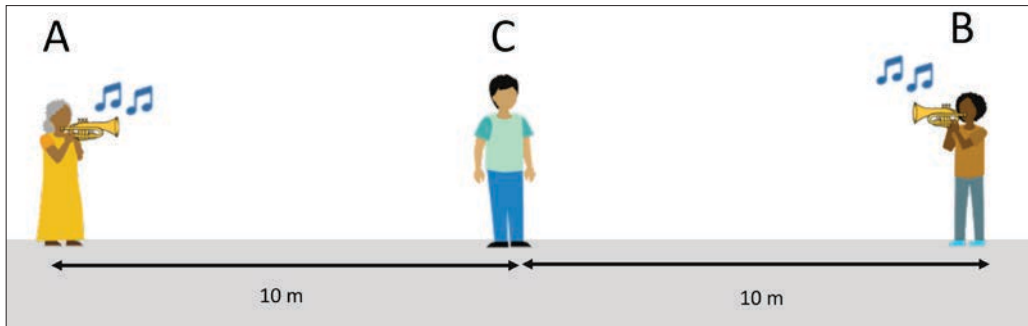
Com haureu pogut comprovar, en aquesta versió de la idea d'interacció llum-matèria parlem dels «tipus» de llum relacionant-los amb la seva energia (la llum UV té més energia que la llum blava, la blava més que la vermella, la vermella més que la IR, etc.), però realment no hem entrat en què vol dir exactament que tingui més energia més enllà dels seus efectes (per exemple, mentre els IR ens escalfen els UV ens poden cremar). Com apuntàvem més amunt, per resoldre aquesta qüestió seria necessari el model d'ona en què cada tipus de llum tindria una freqüència d'oscil·lació i/o una longitud d'ona (λ) que el caracteritza. Però entrar en la naturalesa ondulatoria implicaria haver de preguntar-nos «què» és el que està oscil·lant, i això ens obligaria a pensar en camps elèctrics i magnètics, que en el capítol 4 hem deixat pràcticament de banda a causa del seu alt grau d'abstracció. Al nostre parer, és en la física postobligatòria on caldrà abordar aquesta naturalesa ondulatoria de la llum visible i de la resta de llums de l'espectre.

Ara bé, amb això no volem dir que estigui «prohibit» a la secundària obligatòria fer servir el terme freqüència o longitud d'ona. De fet, és probable que l'alumnat al llarg de la seva escolaritat trobi textos, imatges o vídeos que facin referència a la freqüència o la longitud d'ona com a magnituds que ordenen les diferents llums de l'espectre electromagnètic, i que mirin d'entendre què signifiquen aquestes magnituds. També pot ser que simplement intentin relacionar aquest espectre amb situacions de la seva vida quotidiana (què vol dir que una cadena de ràdio té una freqüència de 91,5 MHz? I que un canal de *walky talky* ocupi una freqüència de 1,2 GHz?). Si realment hi ha un interès i una oportunitat per introduir a la secundària obligatòria aquesta naturalesa ondulatoria de la llum i de les radiacions en general, es pot proposar una explicació qualitativa de la llum, ajudant-los a establir ponts entre aquestes magnituds i els tipus de llum de què parlem, però sense voler pretendre que el gruix de l'alumnat construeixi un model robust d'ona. Així, es pot parlar de la llum que, a més d'un raig, podem imaginar com una mena de «vibració/oscil·lació electromagnètica que pateix l'espai», de manera que a major freqüència de vibració (menor distància entre punts sincronitzats d'oscil·lació o λ) aquesta vibració/oscil·lació estaria més «concentrada» i transportaria més energia.

5.3. La idea de so com a ona mecànica

Abans de començar... Posa a prova les teves idees

En una cercavila toca la banda del poble i, mentre assagen, la persona C es col·loca enmig de A i B, ambdós a 10 m de distància.



1. Al mateix moment, A i B produeixen la mateixa nota MI, però B toca la trompeta més alt que A. Qui sentirà primer la persona C?
2. En el mateix moment, A produeix la nota MI i B produeix la nota SOL, amb la mateixa intensitat. Qui sentirà primer la persona C?
3. Si A produeix la nota MI, el so trigarà el mateix temps viatjant de A a C que de C a B?

Llegiu-ho després d'haver respost individualment

Tot i que molta gent sap que la velocitat de propagació del so a través de l'aire és constant, d'uns 340 m/s en l'aire de la superfície de la Terra, quan es pregunta sobre com de ràpid viatgen diferents sons, molt probablement hi apareguin dubtes. En el primer cas, es busca identificar la confusió entre la velocitat de propagació i la intensitat del so, i és possible que l'alumnat pensi que a més intensitat més ràpid es propaga el so (raonament causal lineal que hem descrit en el capítol 2). En el segon cas, es busca identificar la confusió entre freqüència i velocitat de propagació, i possiblement part de l'alumnat afirmi també que a major freqüència (notes més altes a l'escala musical) més ràpid viatja el so. En la tercera pregunta se cerca la relació entre la velocitat de propagació i l'atenuació. Segons la recerca en didàctica, la major part de l'alumnat afirma que a més atenuació menor és la velocitat de propagació. És a dir, que el so es va frenant a mesura que viatja i que per això s'atenua. Ara bé, en tots els casos el so viatjarà igual de ràpid, de manera que el temps que trigarà el so a recórrer els 10 metres sempre serà exactament el mateix, encara que en disminueixi la intensitat.

5.3.1. El punt de partida de l'alumnat sobre la idea de so

Igual com succeeix amb la llum i el color, els infants no només perceben sons al seu voltant des que neixen, sinó que experimenten amb fenòmens acústics picant objectes, fent servir instruments musicals, etc. Des de ben petits, es comencen a construir les concepcions espontànies sobre el so amb les quals, segons la recerca en didàctica de la física, arriben a secundària. A continuació en destaquem algunes de les més rellevants.

a. So com a entitat material

Nombroses investigacions han fet palès que un important nombre d'alumnat entre 12 i 16 anys conceben el so com si aquest fos una entitat física amb naturalesa material, amb expressions com ara «quan el so arriba a una paret, les partícules del so colpegen les partícules que formen la paret» o bé «en un material porós, el so es filtra pels porus i es queda a dins». De vegades fins i tot dibuixen «ones de so» (una línia ondulant) sortint de la boca quan algú parla.

Una possible interpretació d'aquestes concepcions recau en el fet que els humans tendim a substancialitzar (com veurem en el capítol següent amb l'energia) per explicar els fenòmens en termes d'agents o entitats causals. També en el tractament habitual que es fa del so en el seu ensenyament, parlant del so com una ona (sovint des de primària!) sense entrar en què vol dir això. Quan a l'aula comentem que «les ones es propaguen» això pot induir una forma de raonament sobre les ones com a entitats materials (alguna cosa) més que no pas com a processos. És per això que aquestes concepcions de l'alumnat han de ser detectades i abordades explícitament des de la classe de ciències.

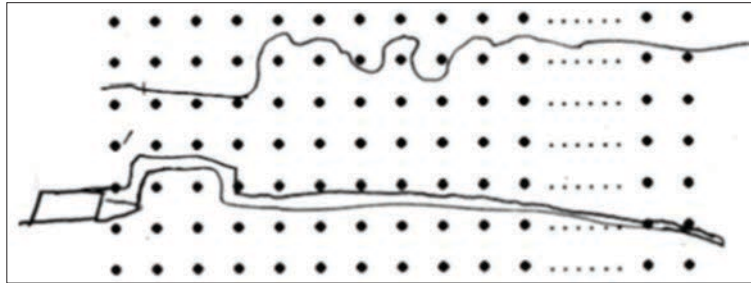


Figura 5.15. Dibuix d'un estudiant que representa com el so «s'obre camí» enmig de les partícules d'una paret.
Font: Hrepic *et al.* (2010).

Aquesta concepció del so com una entitat material influeix, també, en la concepció del medi de propagació com un suport passiu per a la propagació de les ones mecàniques, que es reproduïrien «a través» d'aquest i no «mitjançant» aquest. A causa de la concepció del so com a entitat material, molts estudiants consideren que el medi actua com a impediment o obstacle per a la propagació de les ones, i per tant, solen considerar que el medi en què les ones mecàniques es poden propagar més fàcilment o a més velocitat és el buit, ja que no suposa cap impediment al pas de les ones. En canvi, solen considerar que com més dens és un material, més lenta serà la propagació de les ones mecàniques, i sovint tampoc no reconeixen que el so es pot propagar per mitjans líquids o sòlids. És a dir, veuen les ones com una cosa que passa pel medi en comptes d'alguna cosa que li passa al medi.

b. El so com a propagació de les partícules des de l'emissor fins al receptor

Quan els estudiants expliquen la propagació d'ones mecàniques com el so, sigui mitjançant llenguatge verbal o gràfic, és habitual observar que alguns d'ells estableixen relacions inadequades entre el moviment de vibració de les partícules del medi i el de propagació de les ones, amb expressions com ara «les partícules del medi es mouen seguint la forma d'una ona» o «l'aire que està davant dels altaveus és colpejat i llavors aquest aire viatja fins a les oïdes de manera que puguem sentir el so».

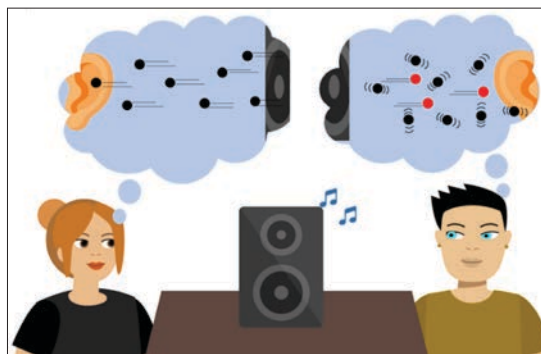


Figura 5.16. Exemples d'idees alternatives sobre el so: com a propagació de les partícules de l'aire i com a propagació de partícules de so (el so com a entitat material) a través de l'aire. Font: elaboració pròpia.

c. Relacions lineals errònies entre amplitud, freqüència i velocitat de propagació

Diverses recerques també han documentat que alguns estudiants relacionen característiques de les ones que són independents entre elles, especialment la velocitat de propagació d'una ona i la seva amplitud. Aquesta concepció la trobem sobretot quan l'alumnat s'imagina que el so «frena» a mesura que es propaga: «els sons s'atenuen a mesura que s'allunyen de la font, fins que s'aturen». De fet, aquesta idea alternativa també es dona en respostes relatives a la llum, però no les hem abordat a l'apartat 5.1 ja que allà ens centràvem només en la idea de raig. Algunes recerques en didàctica de la física han identificat que l'alumnat de primària i secundària relacionen la velocitat de la llum amb la lluminositat de la font de llum: «com més potent sigui el focus, més ràpid es propagarà la llum».

A més, l'alumnat també estableix sovint relacions errònies entre la intensitat del so (és a dir, l'amplitud de les ones) i la seva freqüència (el tipus de so), tal com il·lustren afirmacions com «si les vibracions de l'altaveu són més grans els sons són més aguts» o «els ultrasons són sons extremadament febles, per això no podem sentir-los».

d. Confusions amb la representació d'una funció d'ona en funció del temps i de l'espai

Tot i que les gràfiques d'una funció sinusoidal no són gaire comunes abans dels 16 anys i, per tant, en el nostre context local acostumen a treballar-se a l'educació postobligatòria, s'han identificat importants confusions en la interpretació de gràfiques ondulatories espacials i temporals. En alguns casos, s'interpreta la forma sinusoidal d'aquestes gràfiques com si es tractés de la trajectòria d'una partícula que avança per l'espai «pujant i baixant», cosa que també s'ha identificat quan es pregunta a l'alumnat que expliqui el moviment de les partícules d'aigua a les onades del mar. En molts altres casos, sobretot en edats més avançades quan es treballa la representació gràfica d'una ona, l'alumnat tendeix a confondre el període (T) amb la longitud d'ona (λ) a causa de la seva similitud gràfica.

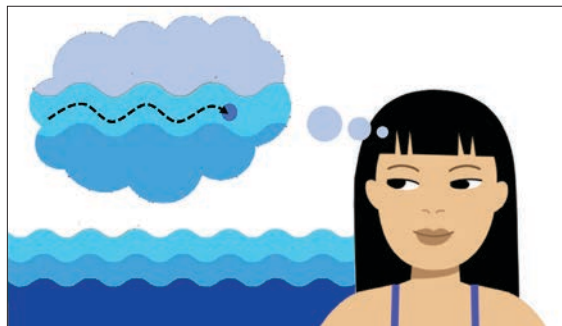


Figura 5.17. Descripció errònia del moviment d'una partícula d'aigua al mar, la trajectòria de la qual correspon a la forma sinusoidal de l'onada. Font: elaboració pròpia.

5.3.2. Com ajudem a construir un model de so com a ona mecànica?

Comprendre la naturalesa del so com una ona mecànica implica entendre que el que es propaga amb el so és una pertorbació originada per una font sonora (un objecte vibrant), que provoca les vibracions de les partícules del medi pel qual es propaga el so. Aquesta idea es pot treballar tant a través de fenòmens físics concrets (com ara instruments musicals, anàlisi digital de sons, observació d'objectes amb comportaments oscil·lants, etc.) com a través d'activitats de modelització del comportament de les partícules en una ona mecànica.

Per exemple, es poden fer activitats de modelització amb el propi cos (corporeïtzació), en què cada estudiant representa una partícula o una petita regió del medi per on es propaga una ona. En aquesta activitat, es pot proposar a l'alumnat que representi una ona transversal i una de longitudinal, variar la freqüència o l'amplitud de cada oscil·lació i comprendre la diferència entre l'oscil·lació en un punt de l'espai amb la

propagació de la perturbació a través de l'espai. La idea n'és arribar a veure que fins i tot sense desplaçar-nos respecte del punt inicial el senyal que volem transmetre sí que es desplaça.



Figura 5.18. Activitat de representació del moviment de les partícules en una ona longitudinal i una de transversal fent servir el propi cos (corporeïtzació). Font: Solbes i Pina (2021).

Les simulacions virtuals poden ajudar a veure el comportament ondulatori. Per exemple, algunes simulacions permeten fer una comparativa entre la propagació d'onades en diferents mitjans, modificar-ne la freqüència (el ritme amb què es creen els fronts d'ona) i l'amplitud (com d'intensos són els fronts d'ona) o fins i tot sentir en temps real el so que genera cadascuna de les freqüències i amplituds seleccionades, i es pot associar, així, la freqüència amb el to i l'amplitud amb el volum.

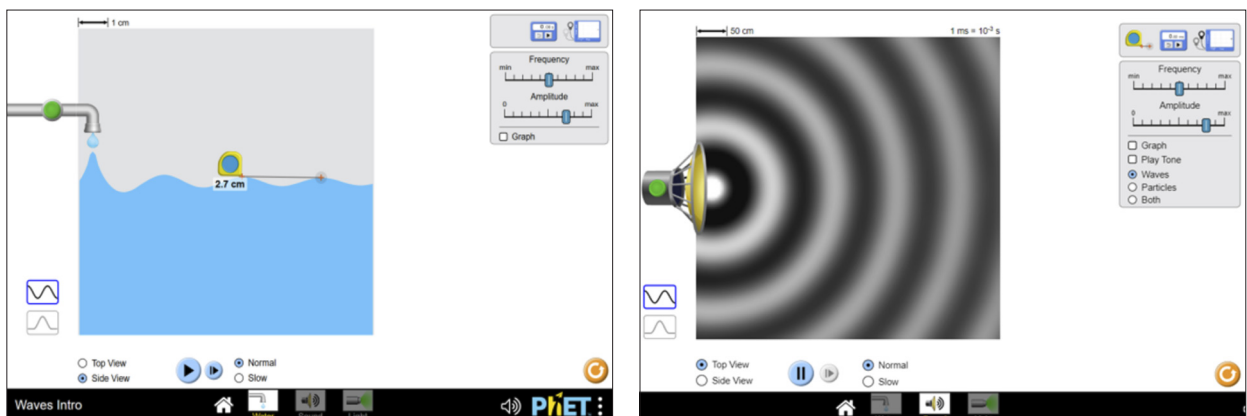


Figura 5.19. Simulació Waves que permet comparar el comportament de diferents tipus d'ones mecàniques i electromagnètiques i experimentar amb les magnituds que caracteritzen aquestes ones. Font: PhET Colorado.

Aquesta relació entre magnituds físiques i característiques del so també es pot abordar a escala experimental, proposant a l'alumnat que emeti o generi diferents sons (amb la veu, amb instruments musicals com ara una flauta, amb generadors digitals de to, etc.), i caracteritzant aquests sons digitalment. Això es pot fer mitjançant aplicacions gratuïtes de mesura de magnituds físiques o també mitjançant programes d'ordinador d'edició de so.

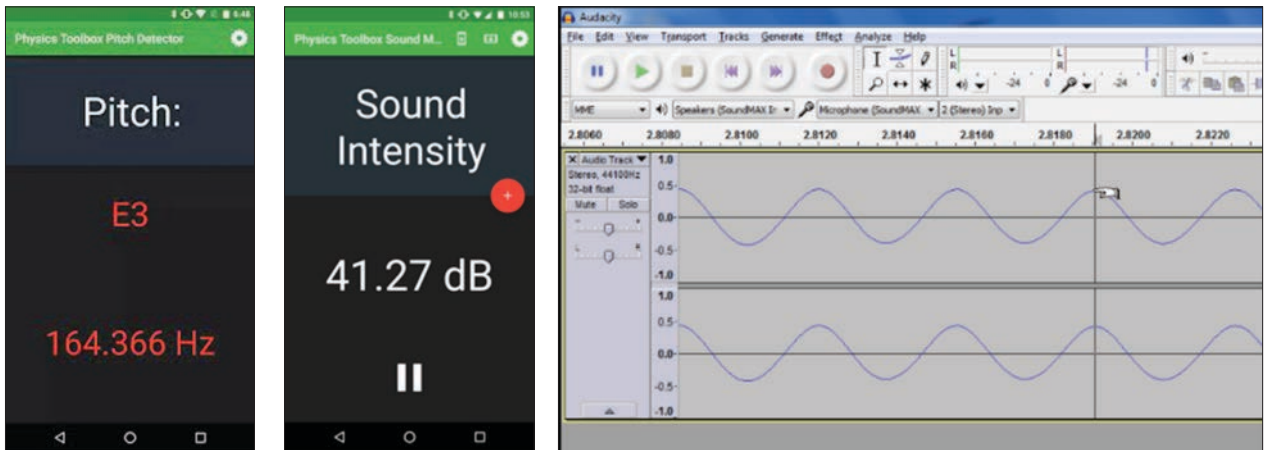


Figura 5.20. Diferents eines digitals per analitzar el so. A l'esquerra, l'aplicació Physics Toolbox Suite, que permet mesurar, entre d'altres, la tonalitat d'un so (en Hz) i la seva intensitat (en dB). Font: Physics Toolbox Suite. A la dreta, captura de la interfície del programa Audacity, que permet representar la forma ondulatoria associada als sons enregistrats. Font: Audacity.

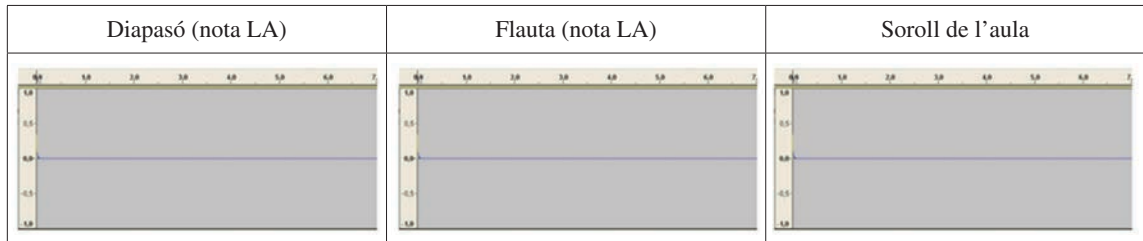
Finalment, també es poden treballar les propietats acústiques dels materials fent servir un model d'interacció amb la matèria semblant al que s'ha observat a l'apartat 5.2, però amb el so, en comptes de fer-ho amb la llum. En folrar una caixa per dins amb diferents materials (pelfa, suro, fusta, etc.), es pot emetre un so dins la capsa i mesurar la intensitat del so resultant. Tot i que mesurant des de fora de la capsa el so s'atenua en tots els casos, en fer-ho des de dins la capsa (posant-hi un mòbil, un micròfon o un sonòmetre), es poden observar diferències en la intensitat segons si el material és reflector (la intensitat resultant serà major amb folre que sense) o si és absorbent (la intensitat resultant serà menor amb folre que sense). Al final del capítol presentem un ABP en què l'alumnat ha de dissenyar un experiment basant-se en aquesta aproximació de la interacció so-matèria en el context de l'aïllament acústic de diferents espais.

Prova-ho a l'aula

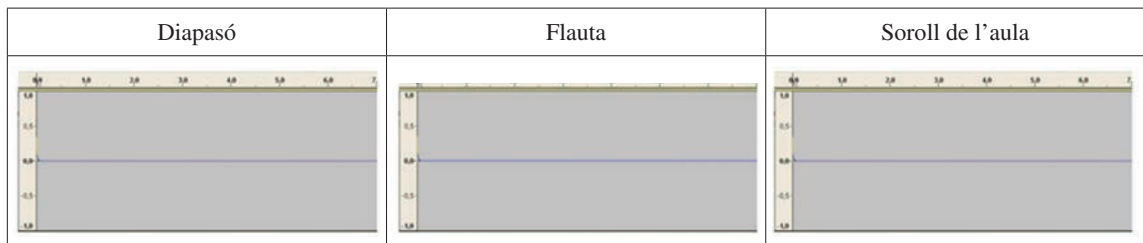
L'anàlisi dels sons (individual o en petits grups)

(Cal tenir instal·lat un programa d'edició de sons com ara el programari gratuït Audacity)

- Abans d'enregistrar els sons que s'indiquen amb el programa Audacity, fes una predicció de com t'imagines que serà la forma de la gràfica que s'obindrà quan capturis aquests sons:



- Un cop feta la predicció, fes les tres mesures. Selecciona una zona en cada cas i amplia aquesta zona fent un zoom; representa els resultats obtinguts:



- Assenyala en els enregistraments que acabes d'obtenir la unitat o el cicle que es va repetint.
- Troba el valor del període en segons de cada cas, si és possible. Recorda que per minimitzar l'error de la mesura és millor que seleccionis més d'un cicle i divideixis el resultat pel nombre de cicles seleccionats.

T (diapasó) = T (flauta) = T (soroll) =

- Calcula la freqüència dels casos anteriors, sabent que $f = 1/T$. Expressa el resultat en Hz:

f (diapasó) = f (flauta) = f (soroll) =

- Explica amb les teves paraules la relació que hi ha entre la forma de la gràfica i la qualitat del so que sentiu en cada cas.

.....

Aquesta activitat inclosa a la unitat didàctica «Els sons que sentim» del grup DIATIC, adreçada a quart d'ESO, està orientada a comprendre la relació entre l'aspecte d'una gràfica freqüència/temps d'una ona sonora i la qualitat del so que sentim. Els sons més «purs» com els que fa el diapasó corresponen a vibracions sinusoidals, mentre que en els sons complexos, com els d'una flauta, tot i que hi ha una periodicitat en la vibració, es poden veure múltiples subvibracions (que en física avançada anomenem harmònics), i la seva composició és la que defineix el timbre d'un so. En el cas del soroll, no hi ha cap patró de repetició, per la qual cosa podem dir que, acústicament parlant, el soroll no té tonalitat pròpia.



A quina versió de la idea del so com a ona mecànica volem arribar i per a què?

Al final de l'escolaritat, un estudiant hauria de ser capaç d'entendre que les ones mecàniques són la propagació d'una pertorbació mecànica (algun tipus de cop o vibració d'un objecte) provocada per un focus emissor, que suposa una transferència d'energia, però, en canvi, no impliquen un transport de matèria. És a dir, que la vibració va passant d'unes partícules a altres sense que aquestes partícules es desplacin seguint la propagació de l'ona, la velocitat de la qual depèn del medi.

Ahora, aquesta vibració de les partícules del medi per on es propaguen les ones mecàniques com ara el so es pot caracteritzar principalment segons dues magnituds: com de ràpid vibra (és a dir, quantes oscil·lacions fa cada segon) i com d'intensa és la vibració (com de grans són els «vaivens» de les partícules en vibració). Aquestes dues magnituds s'anomenen freqüència i intensitat, i la primera s'associa al to d'un so (la seva nota musical) i la segona s'associa al volum d'un so (com de fort se sent), i es mesuren respectivament en Hz i dB. També es poden plantejar altres aspectes, com ara la idea de timbre associada a la complexitat de so (de sons més purs a sons més complexos), així com la naturalesa logarítmica de l'escala de dB, tot i que no recomanem una matematització d'aquests conceptes en l'educació secundària obligatòria, a causa de la seva complexitat.

Finalment, un altre aspecte clau que cal treballar és el fet que, al llarg de la seva propagació, el so com a ona mecànica tendeix a l'atenuació, a causa de dos motius. D'una banda, quan una ona es propaga en totes direccions, l'energia transferida es dispersa, és a dir, es distribueix per l'espai de manera geomètrica (l'energia està més repartida cada cop). De l'altra, també es produeix una atenuació de l'amplitud d'ona a causa de l'absorció de la seva energia per part del medi, tal com desenvoluparem en el capítol següent quan parlem de dissipació i degradació d'energia.

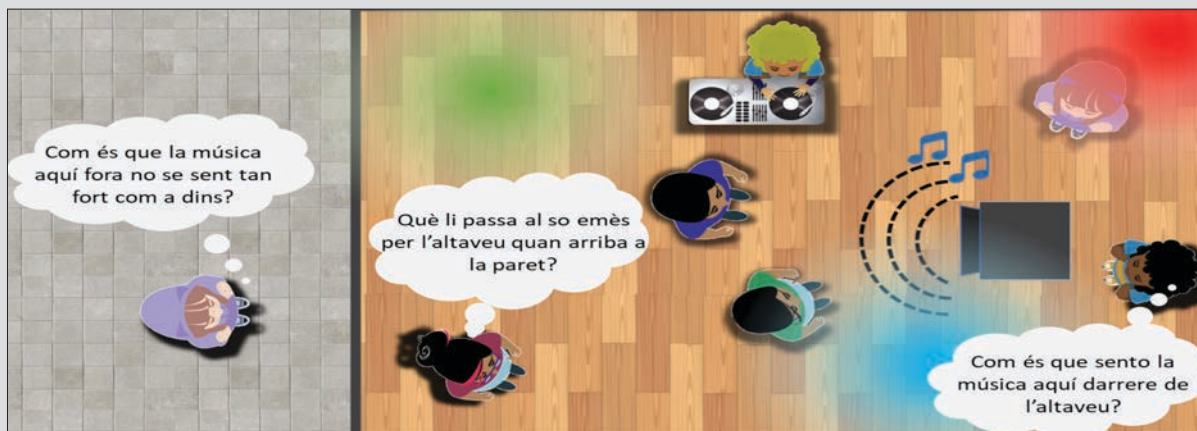
Aquesta versió del model d'ona mecànica (en què es prioritza el raonament qualitatiu a la matematització de les funcions sinusoidals) pot semblar molt simple, però permet una explicació satisfactòria de les qualitats del so que sentim, fa possible explicar físicament les notes musicals i el funcionament bàsic dels instruments i comprendre la diferència entre so i soroll. També permet explicar per què en absència de medi no hi ha propagació del so (i que, per tant, no hauríem de sentir cap so d'explosions a les pel·lícules en què es dispara a naus a l'espai exterior), o que, tot i que pugui semblar poc intuïtiu, el so es propaga millor (amb menys atenuació) per l'aigua o les vies del tren que per l'aire.

A més, aquesta comprensió profunda de la idea de vibració (distingint entre com de ràpid i com d'intensament vibren les partícules del medi) és una base molt sòlida per a què aquells estudiants que prossegueixin els estudis de física postobligatoris comprenguin veritablement la idea de moviment harmònic simple i siguin capaços de distingir les gràfiques $Y(t)$ i $Y(x)$ d'una ona, cosa que acostuma a ser molt costosa a batxillerat i generalment es relaciona poc amb magnituds físiques reals.

ENSENYAR ACÚSTICA A TRAVÉS D'ABP

Com podem insonoritzar un bar musical?

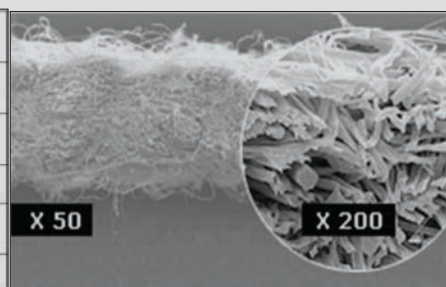
En aquest projecte educatiu, els alumnes han de plantejar-se la insonorització d'un bar musical, responent a diferents preguntes com ara per què a fora no se sent tan fort com a dins o per què hi ha zones dins el bar en què la música se sent més fort que en d'altres. Dins del projecte, han de fer diverses indagacions, comparant les propietats acústiques de diferents materials que volen utilitzar com a reflectors o absorbents de so.



Disposen de diferents materials que poden utilitzar per a la insonorització, com també caixes de cartró que es poden folrar per dins amb cadascun d'aquests materials. Amb una font sonora dins la capsa que emet sempre amb la mateixa intensitat, han de comparar la intensitat mesurada dins i fora de la capsa, i anotar-ne els canvis en els dB mesurats. En paral·lel, els alumnes han de fer una observació detallada dels materials seleccionats, amb l'objectiu de relacionar-ne les propietats acústiques amb la composició. Per exemple, poden observar que la llana de vidre té una estructura porosa que ajuda a absorbir el so, mentre que la fusta amb fòrmica presenta una superfície contínua i és un material dens que el reflecteix.

Amb el conjunt de resultats obtinguts (tant amb el sonòmetre com amb la lupa digital), l'alumnat ha de discutir els avantatges i desavantatges de cada material i acabar seleccionant els millors per a la insonorització del bar musical.

Capsa en estudi	Sonòmetre a l'exterior de la capsa (aïllament)		Sonòmetre a l'interior de la capsa (reflexió i absorció)	
	Intensitat sonora a d = 40 cm (dB)	ΔI (%)	Intensitat sonora a d = 15 cm (dB)	ΔI (%)
Font a l'aire lliure (sense capsa)	80,0	-	86,7(*)	-
Capsa de llana de roca	68,1	14,9 %	85,4	1,5 0 %
Capsa de fusta aglomerada	69,0	13,8 %	100,4	15, 8 %
Capsa de morter	70,8	11,5 %	104,4	20, 4 %



Per saber-ne més: Pintó, R., Couso, D., Hernández, M. I. (2010). *Propietats acústiques dels materials*.

Bibliografia clàssica de referència sobre llum i so:

- COLIN, P.; VIENNOT, L. (2001). Using two models in optics: Students' difficulties and suggestions for teaching. *American Journal of Physics*, 69 (7): 36-44.
- GUESNE, E. (1985). Chapter 1. Light. A: DRIVER, R.; GUESNE, E.; TIBERGHIE, A. (eds.). *Children's ideas in science*. Milton Keynes: Open University Press.
- MCDERMOTT, L. C.; THE PHYSICS EDUCATION GROUP (1996). *Physics by Inquiry*. Nova York: John Wiley & Sons, p. 225-276.
- MILLAR, R.; WHITWORTH, G. (1994). How do we see? Teaching children the scientific model of vision. *School Science Review*, 76 (274): 113-116.
- SELLEY, N. (1996). Children's ideas on light and vision. *International Journal of Science Education*, 18 (6): 713-723.

Capítol 6. Ensenyar energia a secundària

L'energia s'ha d'ensenyar com un model més de la física, anàleg als models que hem discutit en els capítols anteriors? O, per contra, s'hauria de concebre com una cosa molt més transversal, que transcendeix no només la termodinàmica, sinó la mateixa física? Aquest debat, per sort o per desgràcia, no està resolt. Hi ha qui defensa, i amb bons arguments, que l'energia és un concepte transversal i interdisciplinari en ciències i que, per tant, totes les grans idees de la ciència (la idea d'ecosistema, la idea de canvi químic, la idea de força, la idea de canvi geològic, etc.) utilitzen el concepte d'energia d'una manera o una altra. A més, molts experts han advertit que l'energia, com a model, no permet explicar ni el com ni el perquè dels canvis físics, sinó que simplement permet descriure'ls d'una manera particular. Així, el moviment, la gravitació, l'electricitat, la llum o el so, als quals hem dedicat els capítols anteriors, són fenòmens físics interpretables des de la perspectiva energètica, per tal s'analitza, per exemple, qui guanya o perd energia en cada canvi. Per què, llavors, entestar-nos a situar l'energia com «un model més» i dedicar-li l'últim capítol del llibre? Al nostre entendre, el fet de plantejar l'energia a l'alumnat com un model clau de la física pot aportar-li una perspectiva pròpia, unes potents regles de joc per interpretar el món que l'envolta (especialment en l'era de la descarbonització, la crisi i transició energètica), així com un rang de fenòmens rellevants, especialment els fenòmens tèrmics, de gran importància per al nostre dia a dia. El model d'energia que proposem, per tant, es pot organitzar sobre tres grans idees inspirades en la forma que té la termodinàmica d'interpretar el món i els seus fenòmens naturals:

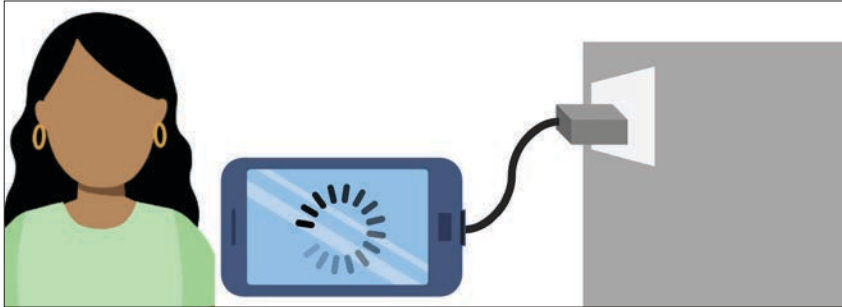
1. La idea d'energia com a funció d'estat.
2. La idea de calor i treball com a mecanismes per a transferència d'energia.
3. La idea de conservació, dissipació i aprofitament d'energia.

Així, com hem fet en tots els capítols anteriors, ens aturarem a presentar quins punts de partida de l'alumnat (les seves idees, raonaments i dificultats) s'han assenyalat des de la recerca didàctica, i quines possibles maneres hi ha de fer progressar aquestes idees cap a altres més científicament adequades, per acabar proposant una versió de la idea a la qual haurien d'arribar al final de la seva educació obligatòria.

6.1. La idea d'energia com a funció d'estat

Abans de començar... Posa a prova les teves idees

Si fem servir el telèfon mòbil al llarg del dia, el més normal és quedar-se sense bateria abans o després. Però què significa exactament quedar-se «sense bateria»? Per respondre a aquesta pregunta, pensa i contesta les aquestes qüestions amb les teves pròpies paraules:



- Què passa en el cable i en el mòbil quan aquest es carrega?
- Què passa en el cable i en el mòbil quan aquest es descarrega? I què surt del mòbil quan es descarrega?

Llegiu-ho després d'haver respost individualment

Prova de fer aquestes preguntes a estudiants de l'ESO. La primera resposta, la més intuïtiva, serà «hi entren electrons», «hi entren càrregues elèctriques» o, simplement, «hi entra electricitat». Arribats a aquest punt, us recomanem que estireu una mica el fil, i torneu a preguntar què passa, si és així, mentre es descarrega la bateria del telèfon: on van els electrons que han entrat al mòbil durant la càrrega de la bateria? Desapareixen? Es transformen en llum o so? Tornen a sortir pel cable elèctric? Això generarà dubtes més que raonables, i possiblement algun estudiant respondrà «en realitat només hi entra energia». Podeu continuar estirant el fil, preguntant-los que s'imaginin veient què passa dins del cable: què creuen exactament que està passant per allà? Hi ha alguna cosa circulant-hi o movent-s'hi?

** Deixarem l'equivalència massa-energia per a cursos més avançats.*

6.1.1. Quin és el punt de partida en la idea d'energia?

En arribar a secundària, tots els estudiants han sentit parlar alguna vegada d'energia, i possiblement han fet servir la paraula en algun moment. És un terme molt usat no només en física, sinó també en les altres disciplines de l'àmbit científic i tecnològic, però també en altres àmbits més socials i personals. La paraula *energia* la podem sentir d'una persona que treballa en ciència, però també a la publicitat, a la política, a les arts, i fins i tot en el món de la màgia i l'esoterisme. De fet, hi ha poques paraules amb usos semàntics tan diferents.

Ara bé, que sigui un terme molt usat no implica que qui el fa servir estigui entenent-ne el significat i, encara menys, el significat específic amb què es fa servir a les classes de física. Durant les darreres dècades del segle xx hi va haver un gran interès per part de la comunitat investigadora en la didàctica de la física per identificar quines idees alternatives sobre energia tenien els estudiants, que va originar una interessant discussió sobre la selecció i la seqüenciació de continguts a ensenyar, i també sobre si durant la instrucció calia enfrontar els estudiants a les seves idees alternatives, o bé si calia acceptar que algunes d'aquestes idees eren difícilment superables en primeres etapes educatives i calia aprendre a conviure-hi. Aquesta discussió ha continuat durant el segle XXI, amb la qual cosa l'ensenyament i l'aprenentatge de l'energia han estat un dels temes estrella de tots els congressos internacionals d'ensenyament de les ciències.

Tot i a risc de simplificar les aportacions realitzades des del camp de la didàctica de la física, podem agrupar els punts de partida dels estudiants de secundària contradictoris amb la idea d'energia en tres grans blocs que corresponen a tres maneres d'entendre-la. Aquestes visions alternatives de l'energia són fàcilment identificables per qualsevol docent que es proposi dialogar amb els seus estudiants sobre què entenen per energia.

a. Energia com a entitat física, com un fluid combustible que té capacitat d'alimentar els objectes.

Molts estudiants conceben l'energia com un fluid que impregna els objectes físics i passa a través d'ells, especialment a través de tubs, cables i altres conductes. Aquest fluid imaginari es pot emmagatzemar i transferir, pot residir inactiu i activar-se per a l'ocasió, per exemple, dins de bateries o dels aliments energètics. La manera particular que té cada estudiant d'imaginar aquest fluid és variada i depèn del context, i va des d'un fluid que té l'aspecte d'un feix de llum en el context de làsers o llanternes, fins a un fluid discontinu format de petites boletes quan parlem d'electricitat o fins i tot un combustible tipus benzina.



Figura 6.1. Representació de l'energia com un fluid material que entra al telèfon mòbil pel carregador, es ramifica per l'interior del dispositiu fins a arribar a la bateria, on s'emmagatzema. Font: estudiant de segon d'ESO de l'INS Pau Vila (Sabadell).

Els orígens socioculturals d'aquesta representació són diversos, però sovint les representacions externes dels models inicials d'estudiants coincideixen amb la dels fluids màgics i enlluernadors comuns en representacions en la ficció infantil (els poders màgics) o els raigs de superpoders provinents del món de l'animació i la ficció d'arreu del món.

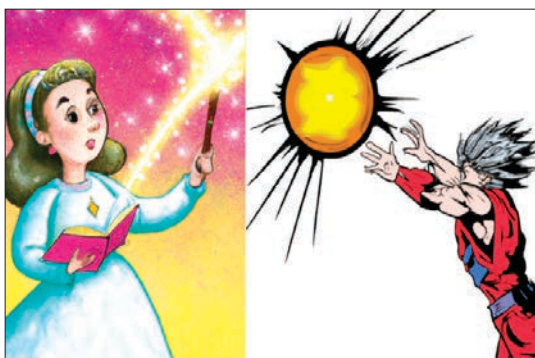


Figura 6.2. Representacions d'energia com un fluid brillant, inspirat en la imatge del foc, els raigs o els gasos ionitzats, que es poden trobar en contextos molt diferents: els contes infantils, el còmic nord-americà, l'*anime* japonès. Font: Elaboració pròpia amb DallE2.

Si bé concebre l'energia com una espècie de fluid té els seus avantatges (ho veurem més endavant, quan parlem de la idea de transferència), imaginar-la com una cosa que passa a través dels objectes i hi resideix dificulta pensar, per exemple, que aixecar un objecte cap amunt implica donar-li energia, i baixar-lo al terra treure-l'hi.

b. Energia com a propietat de les coses vives i actives

Una altra idea molt estesa, de vegades fins i tot compatible amb la idea de fluid que impregna els objectes, és la idea d'energia gairebé com a sinònim de vida i d'activitat. De fet, en el llenguatge quotidià diem que els nens i nenes petits «tenen molta energia», ja que es mouen constantment, salten i grimpen, mentre que la gent gran «tenen poca energia», ja que els seus moviments són més lents i pausats. També diem als nostres nois i noies que han d'esmorzar per «tenir energia per a tot el dia». No és lògic, doncs, pensar que l'energia és la font de vida i activitat?

En la literatura en didàctica de la física trobem molts casos d'aquesta concepció vitalista de l'energia. Estudis dels anys vuitanta del segle passat van identificar que molts estudiants asseguraven que els objectes inanimats mai no podrien tenir energia, i altres estudis van identificar que l'alumnat només associava l'energia amb les coses que es movien (els cotxes, els humans, els robots...). En un estudi recent sobre els models d'energia aplicats a la regulació tèrmica dels animals amb estudiants de 12-14 anys hem identificat que alguns aplicaven la idea d'energia vital per explicar el balanç energètic en la regulació tèrmica de les ovelles. Així, en comptes de pensar que les ovelles mengen per obtenir energia (entre altres coses per regular la temperatura), relacionaven la temperatura de l'ovella amb la seva energia «vital», que adquirien en néixer i que s'anava gastant al llarg de la vida a mesura que l'ovella es refredava fins a morir.

c. Energia com l'agent causal dels canvis

Un altre punt de partida molt comú és la concepció de l'energia com una espècie de força motriu que causa canvis i processos allà on resideix, concepte que alguns experts anglesos van denominar com a *the go of the things*. Com veurem més endavant, és convenient que els estudiants siguin capaços de relacionar l'energia amb els canvis que s'esdevenen al seu voltant, però no com la causa d'aquests canvis. Els vehicles no es mouen perquè tinguin energia cinètica, ni cauen per tenir energia potencial gravitatòria, sinó justament el contrari: els associem energia pel fet de tenir una certa velocitat (que causa l'empenta que els fa el terra en girar-hi les rodes), una certa alçada (que causa la força que els hagi aixecat), entre d'altres. Si l'ensenyament de la física s'orienta exclusivament en l'ús de fórmules com $E_c = 1/2 \cdot m \cdot v^2$ com un problema merament numèric i mancat de raonament, aquesta confusió podria passar desapercebuda. No obstant això, si es vol acompanyar la comprensió conceptual amb l'epistèmica, caldrà ensenyar que l'energia no és un fenomen natural, sinó una manera de mirar els fenòmens quan no volem parlar de les seves causes.

d. La influència del pensament místic i esotèric

El terme energia no és patrimoni de la física, ni tan sols de la ciència. En l'àmbit de l'espiritualitat i l'esoterisme, es fa servir la idea d'energia per referir-se als txakres (molt comuns en l'aplicació de tractaments pseudocièntífics com el reiki), als estats d'ànims, les emocions, les relacions interpersonals, etc. Expressions com «aquesta persona desprèn energia positiva», «tinc l'energia bloquejada» o «encén una espelma per absorbir les energies negatives que hi ha a l'habitació» poden ajudar a confondre encara més el nostre alumnat, i contribuir que tinguin una idea distorsionada de l'energia.

Evidentment, cadascú és lliure de tenir les creences que vulgui, però convindria ajudar el nostre alumnat a distingir en quins casos no es parla de l'energia des d'una mirada científica, sinó espiritual o esotèrica.

6.1.2. Com fem progressar la idea d'energia com a funció d'estat?

Atesa la complexitat de construir una idea d'energia coherent amb el que proposa la termodinàmica, i atesa la gran quantitat d'idees alternatives arrelades que té l'alumnat, no convé que el primer contacte formal que tinguin els nostres estudiants sigui simplement una llista de «tipus» d'energia, acompanyada de la llista d'equacions associades a cada tipus d'energia:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2; E_{pg} = m \cdot g \cdot h; E_{pe} = K \cdot \frac{q_1 q_2}{d} \dots$$

D'aquesta manera, s'estaran mostrant fragments inconnexos que no permeten que l'estudiant es construeixi una idea global: l'energia com a forma de mirar «com estan les coses» i predir (que no explicar) «com poden arribar a estar». I és que aquest «com estan» no és trivial. Diem «com estan» en contraposició a «com són» (és a dir, de quin material estan fetes) i també en contraposició a «què els ha fet estar així» (és a dir, amb qui han interaccionat). Quan parlem d'energia tot això no importa, l'únic que importa és «com estan en un precís moment» i què em diu això de «com poden arribar a estar».

La mirada energètica als fenòmens ha de ser fotogràfica, una comparació d'un «abans» i un «després» en què no ens interessa què ha passat entre ambdós «fotogrames». No convé parlar de l'energia de les coses en valor absolut, sinó a través dels canvis que s'experimenten. Cal ensenyar els estudiants a mirar els fenòmens a través de preguntes que focalitzen la mirada en el canvi de variables observables/mesurables: «en què ha canviat l'estat de les coses al llarg d'un procés natural?», «en què ha canviat la seva velocitat?», «i l'alçada?», «i la temperatura?», «i la pressió?»... En fer-ho, de manera intuïtiva els estudiants podran identificar que hi ha un estat (inicial o final) al qual s'associa més energia. A més, en fer-ho, ràpidament apareixerà una altra idea: els fenòmens estan encadenats: si alguna cosa passa a estar més freda, irremeiablement hi ha alguna altra cosa que haurà passat a estar més calenta, encara que sigui una cosa tan imperceptible com l'aire, les parets o el terra. D'aquesta manera, es pot ajudar l'alumnat a construir la idea que l'energia és la forma de mirar com ha canviat l'estat de les coses. De fet, això seria l'explicació del fet que a la física universitària parlem de l'energia com una funció d'estat.

Prova-ho a l'aula

Qui guanya i qui perd? (individual o en grup)

Pensa en les tres situacions següents. En totes elles pots pensar com estaven les coses al principi i com han quedat al final. Justifica quines creus que tenen més energia al final en comparació al principi a partir de com n'ha canviat l'estat. En cada cas, identifica les variables rellevants a les quals associes energia.

Situacions:	Abans	Després
1. Una bombona de gas amb un fogó que escalfa l'aigua d'una paella	<p>..... tenia més energia, ja que estava</p> <p>..... tenia menys energia, ja que estava</p>	<p>..... té menys energia, ja que ara està</p> <p>..... té més energia, ja que ara està</p>
2. Una bateria connectada a una resistència elèctrica (bobina) que escalfa aquesta mateixa paella	<p>..... tenia més energia, ja que estava</p> <p>..... tenia menys energia, ja que estava</p>	<p>..... té menys energia, ja que ara està</p> <p>..... té més energia, ja que ara està</p>
3. Una bateria connectada a un motor que fa girar una politja per aixecar una càrrega pesant	<p>..... tenia més energia, ja que estava</p> <p>..... tenia menys energia, ja que estava</p>	<p>..... té menys energia, ja que ara està</p> <p>..... té més energia, ja que ara està</p>

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Aquesta activitat permet introduir de manera simple i qualitativa la idea d'energia com a funció d'estat, ja que posa el focus en el canvi que s'ha produït en variables rellevants de cada sistema o en cada part del sistema. Per fer això, aprofita una idea prou intuïtiva per a l'alumnat, que és la idea de guanyar/perdre energia segons l'estat del sistema. És fàcil que un estudiant associï més energia a una paella amb aigua calenta que no pas a una paella amb aigua freda, i també més energia a una bateria carregada que a una de descarregada, fins i tot sense entendre en detall quins processos físics o químics es donen dins de la bateria.

A més, permet començar a pensar en equivalències: amb la mateixa bateria puc escalfar aigua o fer girar una politja. Per tant, implícitament estem fent servir la idea d'energia per equiparar canvis que, sense la idea d'energia, serien impossibles de comparar, ja que són de naturalesa diferent (tèrmica i mecànica, respectivament).

Com hem dit, a mesura que els estudiants s'impliquen en el procés de descriure els fenòmens físics en termes energètics fent servir la idea de «com està el sistema» i identificant aquelles parts i variables del sistema rellevants en cada moment, podem orientar la mirada a l'encadenament entre canvis: sempre que un sistema (o part d'un sistema) passa a tenir més energia que abans, n'hi ha un altre (o part d'ell) que passa a tenir-ne menys. Mai no passa que ambdós sistemes perdin energia i, si fos així, voldria dir que hi ha un tercer sistema (habitualment l'ambient) que no estem considerant i que està guanyant energia sense que ho percebem.

Quan treballem amb l'alumnat la idea d'energia, al principi serà comú que els estudiants barregin descripcions de naturalesa física i fenomenològica amb descripcions de naturalesa energètica, fent servir expressions com «l'energia es transforma en electricitat o llum» o «l'energia esdevé moviment». Quan això passi, és important posar l'èmfasi en què la mirada energètica no és una simple descripció del que s'esdevé (els objectes es mouen, cauen, s'estiren...), sinó una interpretació particular dels fenòmens adreçada a seguir la pista dels canvis. És a dir, que ens interessa veure com uns canvis en desencadenen altres.

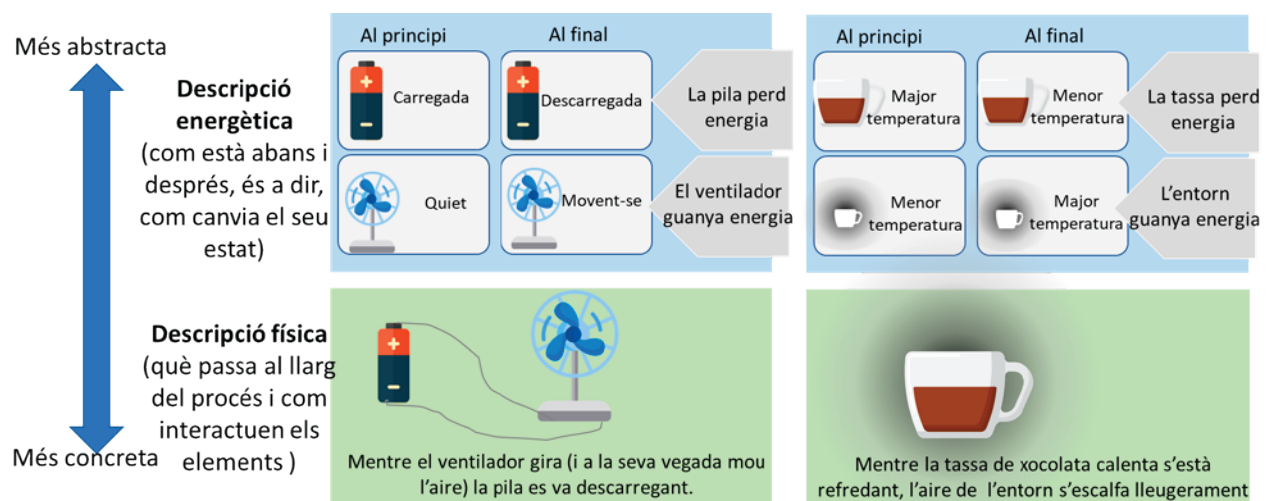


Figura 6.3. Proposta de representació de la descripció energètica i física d'un fenomen. La de dalt, de caire més abstracte, està centrada a identificar les variables que associem a l'energia i que ens ajuden a pensar quina part del sistema guanya energia i quina en perd. La de sota, en canvi, se centra en la descripció del procés (com n'és, de ràpid, quins passos hi ha al mig, com interactuen els elements entre ells). Aquesta descripció física pot ser macroscòpica o bé microscòpica, incloent-hi el moviment i la interacció de les partícules constituents dels materials.

Font: elaboració pròpia.

A més, en aprendre a parlar dels fenòmens en termes d'energia, cal vigilar de no acabar «eclipsant» la descripció física i fenomenològica amb la descripció energètica, ja que aquesta podria aparentar tenir més rigor o profunditat per un ús de llenguatge sofisticat, però en realitat amagar la no-comprensió del fenomen. Per exemple, si la pregunta és «com funciona una placa fotovoltaica?», podria semblar que la resposta «transforma l'energia lluminosa en energia elèctrica» és molt científica, però en realitat seria el mateix que la descripció física i fenomenològica «transforma la llum en electricitat». En aquest cas, la idea d'energia no hi aportaria cap valor afegit. Si, en canvi, la resposta és «aprofita part de l'energia del Sol, però no tota», sí que estariem traient partit a la idea d'energia, ja que l'energia serviria com a magnitud per comparar el que entra i el que surt de la placa. Hi insistim: sempre des de la lògica de seguir la pista dels canvis. Per acabar, per entendre realment què passa necessitaríem una explicació en termes d'interaccions (per exemple, interacció llum-matèria). El model d'energia ens permet, però, que quan no necessitem aquesta explicació mecànica en termes causals, encara puguem comparar canvis i predir situacions. Per exemple, si trigo quinze minuts a pujar un grau la temperatura d'una tassa exposant-la al Sol directament, quant pujarà la temperatura de la mateixa tassa si l'escalfem amb una placa vitroceràmica alimentada per una bateria que s'ha carregat durant quinze minuts amb una placa solar?

6.1.3. A quina versió de la idea de funció d'estat volem arribar i per a què?

A través d'aquestes i altres activitats que ajudin a dirigir la mirada dels fenòmens a través del seu estat, hem de promoure que els alumnes comprenguin que l'energia no és ni un fluid brillant que resideix en els cossos, ni un sinònim d'activitat, força o temperatura, sinó una magnitud abstracta que associem als cossos (o els sistemes compostos per diversos cossos) en funció del seu estat, és a dir, de «com estan» en un moment donat, i que canvia quan el seu estat canvia. També volem que els estudiants comprenguin que els canvis en l'estat dels cossos o sistemes sempre estan encadenats, i que quan un sistema perd energia un altre en guanya, encara que de vegades no percebem aquest segon canvi. Quan això passi, el repte és justament esbrinar «on ha anat» l'energia que sembla que falta, és a dir, quin altre element ha canviat d'estat durant el procés.

Les aplicacions d'aquesta idea per comprendre científicament situacions en la vida quotidiana són innumbrables, com, per exemple, per entendre millor el funcionament de les centrals elèctriques, el concepte de càrrega de les bateries de dispositius mòbils, el concepte d'estalvi energètic, etc. Aquestes explicacions es poden enriquir amb les idees de transferència, degradació, conservació, que discutirem en els propers anys, ja que tots aquests conceptes es relacionen entre ells de manera molt estreta.

A més, un cop entesa la naturalesa abstracta com a «funció d'estat» que representa l'energia, serà molt més fàcil introduir les equacions necessàries per mesurar els canvis d'energia a partir dels canvis en l'estat (d'alçada, de compressió, de velocitat, de pressió, etc.). En l'educació postobligatòria, la matematització de l'energia permetrà tot tipus de càlculs de conservació, dissipació, rendiment, etc., a través d'una àmplia gamma d'equacions i relacions numèriques. No obstant això, la nostra experiència ens mostra que la major part de problemàtiques en la resolució de problemes de física al batxillerat no es donen en el maneig de les equacions, sinó en la comprensió qualitativa que no s'ha abordat correctament. De fet, l'aplicació sense raonament del teorema de la conservació de l'energia mecànica fa que molts alumnes expliquin que l'alçada es converteix en velocitat quan un mòbil baixa un pendent. També les dificultats respecte dels fenòmens en què es barregen situacions mecàniques amb termodinàmiques (per exemple, en presència de fricció i escalfament de peces i de l'aire).

El racó de pensar

Quanta energia té un objecte?

En realitat, no té sentit plantejar quanta energia tenen els objectes o els sistemes en absolut, sense tenir en compte què en vam fer abans, ja que només podem quantificar l'energia que es guanya o es perd en un canvi, no quanta «es posseeix». Pensem, per exemple, en una caixa de fusta d'aproximadament 1 kg, situada sobre una taula a 1 m d'alçada. Ràpidament pensariem que la caixa té uns 10 J d'energia potencial.

Però què passa si, a més, la taula resulta estar a la tercera planta d'un edifici? Caldria afegir-hi uns 100 J més. I si l'edifici es troba en una ciutat situada a uns 100 m sobre el nivell del mar? Podríem afegir-hi 1000 J més d'energia potencial.

A més, si tenim en compte que la fusta està a temperatura ambient de 20 °C, també podríem associar-hi una certa energia interna relacionada amb aquesta temperatura. Si volguéssim, per exemple, escalfar un tros de gel a 0 °C amb la fusta (sí, sembla una cosa absurda, però físicament es pot fer), caldria tenir en compte que la calor específica d'aquest material és d'uns 0,5 kcal/°C · kg, per la qual cosa estariem transferint al líquid més de 10.000 calories, uns 48.000 J. De debò hi ha tanta energia en un tros de fusta? I si directament cremem la fusta? Doncs assumint que el poder calorífic de la fusta s'acosta als 20.000 kJ/kg, podríem dir que la fusta té 20 milions de J!

Fixeu-vos que aquesta situació es pot portar a situacions encara més absurdes: tenint en compte que la Terra gira sobre si mateixa a uns 450 m/s, per la qual cosa la caixa de fusta tindria més de 100.000 J d'energia cinètica, però si considerem que la Terra es desplaça al voltant del Sol a uns 30 km/s, podríem associar més de 450 milions de J a la caixa! En la seva versió més extrema, podríem simplement associar quanta energia té la caixa d'1 kg relacionada amb la seva massa, usant l'equivalència massa energia $E = m \cdot c^2$. Si fóssim capaços de convertir tota aquesta massa en energia mitjançant reaccions nuclears imaginàries, podríem dir que a la caixa de fusta hi ha emmagatzemats trilions i trilions de J.

Així doncs, quanta energia té «en realitat» la caixa? En termes de la física escolar, no té sentit mirar de respondre aquesta pregunta.

6.2. La idea de calor i treball com a mecanismes per transferir energia

Abans de començar... Posa a prova les teves idees

Imagina que tens dos glaçons acabats de sortir del congelador. Deixes els dos glaçons sobre una mateixa superfície i cobreixes un dels glaçons amb una tela o peça de roba feta d'algun material com els que fem servir per abrigar-nos quan tenim fred, com ara llana.



Què li passarà al glaçó abrigat? Es fondrà abans o després que el glaçó desabrigat?

Llegiu-ho després d'haver respost individualment

Si proveu de fer aquesta pregunta a estudiants dels primers cursos de l'ESO i els demaneu que justifiquin la resposta, segurament sentireu una resposta que parla de la llana o de la roba d'abric com un material calent, com un material «que escalfa» i, per tant, en abrigar un dels glaçons, creuen que aquest es fondrà abans.

En canvi, en fer l'experiment, veurem que el glaçó «abrigat» realment es fon més lentament que el nu, ja que el contacte que té amb l'aire ambiental és menor, i hi ha menys transferència d'energia de l'exterior cap al glaçó.

Aquest experiment també es pot fer posant el glaçó sobre superfícies diferents, com ara una de metàl·lica i una de fusta. En preguntar quin material és més càlid, l'alumnat tendirà a respondre que la fusta és més càlida que el metall, ja que, quan la temperatura ambiental és menor que la nostra temperatura corporal, percebem una sensació de fred o frescor en tocar un metall. En canvi, un glaçó es desfà més ràpidament sobre el metall que sobre la fusta, perquè aquest condueix millor l'energia transferida! De fet, quan notem el metall fred no n'estem notant la temperatura, sinó la conductivitat.

6.2.1. Quin és el punt de partida en la idea de calor i treball?

Des de la primera infància, les persones percebem en el nostre entorn que hi ha coses fredes i calentes, observem canvis de temperatura en l'ambient i en els objectes: cal refredar la sopa bufant perquè no cremi, i els gelats es desfan a les mans si no ens els mengem ràpid. Si tenim fred, ens abriguem amb jaquetes, guants i gorres, si pot ser fets d'un material «ben calentet». De la mateixa manera, també experimentem des de ben menuts l'esforç necessari per arrossegar, empènyer o aixecar objectes pesants. Estirem objectes per deformar-los i jugar-hi. Sabem que si donem corda a una joguina o li posem piles després es mourà o saltarà.

Totes aquestes experiències quotidianes, i la manera amb què en parlem en el llenguatge quotidià, fan que els nens i nenes construeixin de manera intuïtiva les seves pròpies idees sobre calor i treball en l'edat infantil, i per tant, moltíssim abans del moment en què aquestes idees s'introdueixen formalment a l'escola. La recerca en didàctica de les ciències ha identificat moltes d'aquestes idees alternatives, i en molts casos s'ha observat una coincidència entre aquestes idees intuïtives i les construccions històriques d'idees científiques d'èpoques passades, com la idea de calor com a fluid o «calòric».

A continuació ens centrem en les tres idees alternatives sobre calor i treball que considerem més rellevants per entendre quins poden ser els punts de partida per fer progressar els models dels nostres estudiants:

a. El fred com a entitat física

En el llenguatge quotidià és comú fer servir expressions com ara «tanca la finestra que entra el fred» o «la setmana que ve arribarà el fred». Fins i tot en el camp professional d'instal·lació de sistemes de refrigeració es fa servir la unitat «frigòria» per mesurar la capacitat dels aparells tèrmics per refrigerar l'aire. Operar mentalment amb el fred com a entitat física que va d'un lloc a un altre pot semblar molt intuïtiu i útil per pensar per què alguns materials aïllen millor que d'altres (no deixen passar el fred, com es mostra a la figura 6.4). Això, però, dificultarà pensar, per exemple, en el funcionament dels aparells de refrigeració: si els aires condicionats transformen l'electricitat en fred, com asseguren de manera intuïtiva molts estudiants, abusar del seu ús a l'estiu no seria una solució en comptes d'un problema per a l'escalfament global?

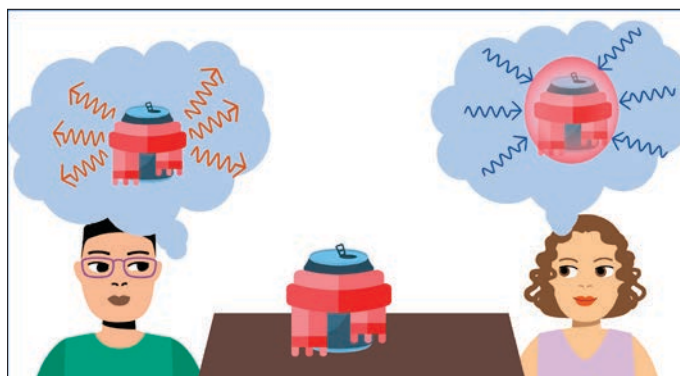


Figura 6.4. Explicació elaborada per un estudiant de primer d'ESO en què la llana de les ovelles exerceix de barrera per evitar que el fred entri dins del cos de l'animal, el qual en intentar-hi entrar rebota i torna cap a fora. Veure la imatge en color a la versió digital del llibre. Adaptat de Vergara, López-Simó i Couso (2020).

b. La temperatura «pròpia» dels cossos

Una altra idea espontània molt arrelada parteix de la suposada existència d'objectes de naturalesa freda, com els metalls o el vidre, i altres de naturalesa calenta, com la llana o les plomes. En aquesta visió els materials poden coexistir indefinidament a diferent temperatura, perquè la temperatura és una propietat de l'objecte (com ho era ser pesant o lleuger). Per exemple, en una cadira feta de fusta i de metall es pensa que les parts metàl·liques estan més fredes que les de fusta, independentment de quina sigui la temperatura de l'ambient. De fet, l'aire de l'ambient moltes vegades és obviat pels estudiants a l'hora de construir les seves explicacions sobre fenòmens tèrmics, mentre que en altres situacions molts estudiants pensen que l'aire no té temperatura o no se li pot associar energia. Tots aquests raonaments dificulten pensar en la calor com un procés de transferència entre cossos a diferent temperatura, sempre del de temperatura superior al de temperatura inferior (fins i tot si per a nosaltres tots dos objectes estan freds, per exemple de la neu a zero graus a l'ambient a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$). Així, cal buscar estratègies per posar a prova aquests models i fer-los progressar.

c. La confusió entre força i energia

La literatura ha identificat també múltiples confusions entre les idees de força i d'energia, algunes de les quals tenen una certa relació amb les dificultats i idees alternatives sobre forces que ja hem discutit en el capítol 2. Si demanem, per exemple, a estudiants de l'ESO que expliquin fenòmens físics en què intervé una transferència d'energia mitjançant treball (és a dir, deguda a una força que genera un desplaçament), com pot ser el cas de la frenada d'un vehicle, possiblement vegem com barregen descripcions del que abans hem definit com el pla de les descripcions físiques o fenomenològiques amb les descripcions energètiques a la figura 6.3. Per exemple, si un estudiant afirma que «l'energia del motor es transforma en força de les rodes», podem veure que està confonent una propietat (energia) amb una interacció (força).

6.2.2. Com fem progressar la idea de calor i treball com a mecanismes per transferir energia?

Una manera de superar idees alternatives sobre fred i calor com les expressades a l'apartat anterior és posar els estudiants a investigar què passa quan dos objectes a diferent temperatura es posen en contacte. És convenient en algun dels casos usar fenòmens que no siguin intuïtius i la predicció dels quals pugui ser contradictòria. En l'exemple següent es proposa a l'alumne que mesuri, a través de sensors digitals de temperatura, l'evolució de la temperatura de dos recipients prèviament emplenats amb aigua calenta, però un dels quals està recobert de llana.

També és convenient que, durant el procés d'ensenyament-aprenentatge sobre transferència d'energia els estudiants trenquin amb el binomi temperatura-calor, per veure que no sempre van de la mà: tot i que en els fenòmens tèrmics sovint hi ha increments de temperatura per calor (és a dir, a causa que un cos a més temperatura escalfa el cos a menys temperatura), hi pot haver transferència d'energia per calor sense provocar canvis de temperatura, com passa en els canvis d'estat, i també que es pot augmentar la temperatura sense calor, per exemple realitzant un treball (per fregament, pressió, agitació...).

Es pot proposar, per exemple, que escriguin a la pissarra una llista tan llarga i diversa com puguin de maneres d'escalfar un objecte. Després, es pot proposar que organitzin aquestes maneres d'escalfar segons si és posant l'objecte en contacte amb una cosa calenta, o bé si és a través de forces, per ajudar-los a construir la idea de calor i de treball com a mecanismes de transferència, i no com a formes d'energia en si mateixos.



Figura 6.5. Activitat feta amb pissarra digital per classificar les maneres d'escalfar un got d'aigua.

Primer s'escriuen tots els noms a la pissarra, i després s'organitzen en dos grans grups, els referents al treball i els referents a la calor. Font: López, Grimalt i Couso (2018).

En el procés de construcció de la idea que l'energia es transfereix en forma de calor o mitjançant la calor (quan dos cossos a diferent temperatura interactuen modificant la temperatura de l'altre) o realitzant treball (quan dos cossos interactuen a través de forces que en modifiquen la quantitat de moviment), poden sorgir dubtes sobre què passa amb altres formes de transferir energia, com l'electricitat o la radiació. Tot i que algunes propostes didàctiques advoquen per ampliar el ventall de mecanismes de transferència d'energia, creiem que és convenient fer veure als nostres estudiants que l'electricitat es pot imaginar com un treball mecànic (càrregues fent-se força entre elles i provocant els seus desplaçaments) i que la radiació que desprenen els cossos pel fet d'estar calents és una forma de calor a distància.

Prova-ho a l'aula

Quant escalfa la llana? (en grup)

Segur que saps que molts animals tenen un pelatge que els permet protegir-se del fred. Un dels pelatges més coneguts és la llana, que s'obté de les ovelles. Possiblement a casa tens un jersei o una bufanda de llana, que segur que consideres molt «calentet».

1. Per què creus que normalment es diu que la llana escalfa?
2. Per conèixer millor la funció de la llana a les ovelles o a la roba, disposes de dues llaunes de refresc buides, una d'elles recoberta amb llana, i l'altra descoberta. Omplim ambdues llaunes amb la mateixa quantitat d'aigua a 50 °C. A la gràfica de l'esquerra fes la predicció de com serà la temperatura per a cada llauna (indica quina línia correspon a cada llauna), i a la de la dreta representa-hi el resultat obtingut.



Predicció	Resultat de l'experiment

3. En què s'assemblen i en què són diferents les gràfiques de la teva predicció i les del teu resultat?
4. Després de fer l'experiment, què opines de la frase «la llana escalfa»?

.....

.....

.....

Amb aquesta activitat, extreta d'Herreras et al. (2016), l'alumnat pot posar a prova les seves idees prèvies sobre la calor. En molts casos, sobretot en els primers cursos de l'ESO, faran una predicció en què la llauna amb llana s'escalfarà. Després de fer l'experiment podran observar que la temperatura de la llauna recoberta de llana no puja, sinó que també baixa com l'altra, però de manera més lenta. Això pot ajudar a construir la idea que, en realitat, la llana no escalfa, sinó que fa que les coses no es refredin o perdin temperatura tan de pressa. És a dir, la llana impedeix la transferència d'energia en forma de calor entre l'ovella i l'exterior. A més, aquesta activitat admet moltes variants, com ara fer servir aigua freda (com proposàvem a l'inici de la secció 6.2), per tal d'observar que la llauna recoberta triga més a escalfar-se. En cursos superiors es pot investigar sobre la corba de la gràfica temperatura – temps per ajudar a construir la idea d'equilibri tèrmic com una interacció de les dues parts. També es poden fer versions incloent-hi llaunes amb «orelles» o llaunes envoltades d'altres llaunes per veure l'efecte de la superfície de contacte en els fenòmens tèrmics tot estudiant diferents mecanismes de regulació de la temperatura.

El racó de pensar

Transferència o transformació d'energia?

Si bé és tan correcte dir que l'energia «es transfereix» com «es transforma», l'ús d'un terme o un altre té connotacions diferents. El primer terme suggereix la idea de «passar d'un lloc a un altre», mentre que el segon suggereix la idea de canviar de naturalesa, «passar a ser una altra cosa».

D'acord amb el model escolar d'energia desenvolupat al llarg del capítol, nosaltres ens decantem per usar «transferència» per construir la idea de cadena energètica, que, a més, permet afegir la pregunta de si aquesta transferència es realitza mitjançant treball o mitjançant calor, i de com d'eficients són aquestes transferències.

No obstant això, cal reconèixer que en els processos en què canvia l'estat d'un únic objecte, parlar de transferència sona estrany. Per exemple, mentre un cos cau, perd alçada (i per tant, energia potencial), alhora que guanya velocitat (i per tant, energia cinètica). És cert que, si som estrictes, podríem dir que l'energia potencial s'associa no pas a l'objecte que cau, sinó al sistema objecte-Terra, ja que en gravitació l'alçada no és una propietat de l'objecte, sinó del resultat de la interacció gravitatòria dels dos cossos. De la mateixa manera, la velocitat, com hem argumentat en el capítol 2, tampoc no és una propietat absoluta dels cossos, sinó que depèn del sistema de referència (en aquest cas, el terra que es consideraria en repòs). Per tant, tècnicament podríem dir que en una caiguda lliure l'energia es transfereix del sistema objecte-Terra (que porta associada una alçada) al sistema objecte-terra (que porta associada una velocitat). Però és evident que aquest nivell d'explicació és excessivament carregós per a l'ESO, i que tota aquesta explicació se simplifica dient que l'energia potencial de l'objecte es «transforma» en energia cinètica.

Per aquest motiu, proposem usar sempre que sigui possible el terme «transferència», i reservar «transformació» per caracteritzar processos en què canvien dues propietats de l'estat d'un objecte o sistema alhora (cau i augmenta la velocitat, frena i s'escalfa, s'expandeix i es refreda, etc.). Utilitzar transformació per dir que l'energia elèctrica s'ha transformat en lumínica, per exemple, no ens aporta res. En parlar de diferents «formes d'energia» que es transformen unes en altres ens allunyem de la idea de parlar de diferents estats del sistema. Diem molt més quan afirmem que l'energia emmagatzemada a la pila es transfereix a la bombeta, que ho fa fent-hi un treball (càrregues generant una força que atreu altres càrregues) i que ho sabem perquè s'escalfa i s'encén.

6.2.3. A quina versió de la idea de calor i treball volem arribar i per a què?

L'anàlisi i discussió de fenòmens quotidians de vegades poc intuïtius ha d'ajudar els estudiants a superar la idea que la calor i el fred són entitats diferents, que resideixen en els cossos i/o que són propietats intrínseques d'aquests. La distinció entre calor i treball pot semblar primmirada, però és extremadament útil per interpretar situacions quotidianes. Per exemple, si haig de canviar la cuina de casa i triar el tipus de plaques de cuina, quina diferència hi ha entre una vitroceràmica i una d'inducció? La vitroceràmica es basa a escalfar primer la placa perquè després aquesta escalfi les olles i paelles que es col·loquin a sobre (per tant, transfereix energia mitjançant calor), mentre que la d'inducció es basa, a través de forces electromagnètiques produïdes per electroimants, a agitar les partícules de l'interior del material del qual estan fetes aquestes olles i paelles (per tant, transfereix energia realitzant un treball). Això permet entendre la diferència entre la inducció i la vitroceràmica, i per què les olles i paelles d'inducció han d'estar fetes d'un material especial que pugui «rebre» aquest treball exercit per les plaques d'inducció.

Els estudiants que prossegueixin la formació científica postobligatòria podran veure aquestes idees desenvolupades incorporant-hi el concepte de forces conservatives i no conservatives i el diferent efecte que té el treball efectuat per aquestes forces en el canvi d'energia d'un sistema. A més, un model qualitatiu que distingeix entre calor i treball els permetrà comprendre models més complexos, com la idea de màquina tèrmica tan útil per entendre la segona llei de la termodinàmica i explicar el funcionament d'un aparell de refrigeració.

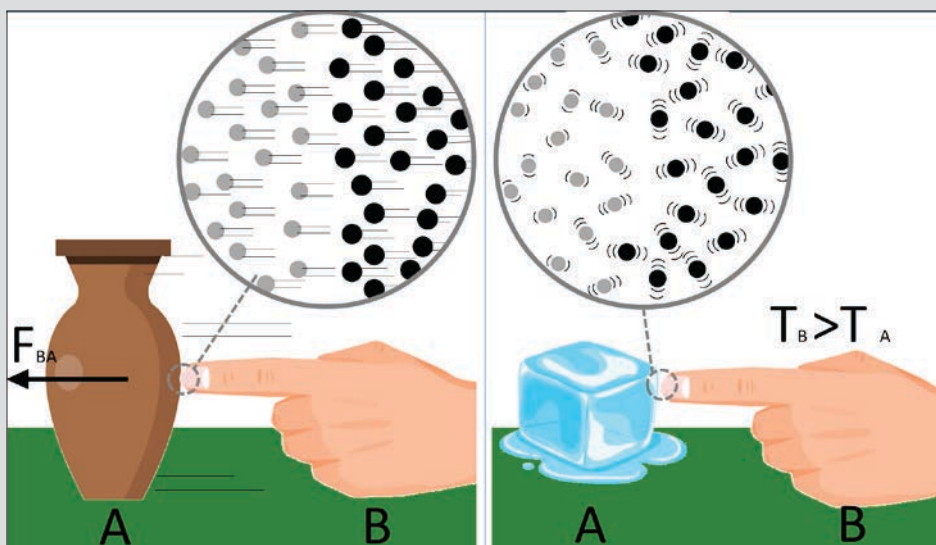
El racó de pensar

Treball i calor, ordre i desordre

Si imaginem les propietats macroscòpiques dels objectes a través del moviment (vibració i desplaçament) de les seves partícules constituents (sense entrar en la naturalesa química d'aquestes partícules) podem dir que:

- Un canvi en el moviment d'un objecte implica un canvi de moviment coherent de totes les partícules de l'objecte en la mateixa direcció i el mateix sentit, independentment de com estiguin virant. És a dir, quan fem un treball estem produint un canvi de moviment ordenat.
- Un canvi en la temperatura d'un objecte és un canvi en el moviment caòtic de totes les seves partícules. És a dir, quan escalfem o refredem estem produint un canvi de moviment desordenat.

Aquesta connexió macro-micro permet explicar la diferència entre la qualitat de la transferència d'energia que es realitza mitjançant treball (transferència d'energia més direccional) i la que es transcorreix en forma de calor (menys direccional), tal com representa el diagrama de la figura següent. En el primer cas, totes les partícules del dit B empenyen de manera coherent les partícules de la gerra A, i això provoca que totes canviïn de moviment alhora. En el segon cas, cada partícula del dit B movent-se aleatòriament empeny una partícula del glaçó A en una direcció diferent, cosa que provoca que el glaçó A no canviï el moviment mecànic, sinó el moviment desordenat de les seves partícules.

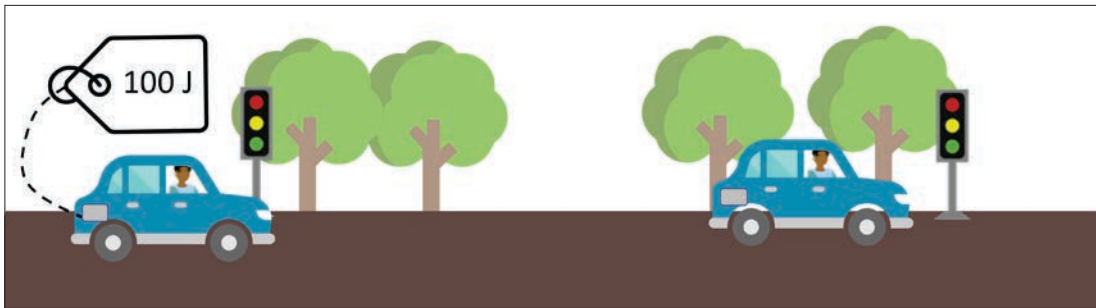


Aquesta asimetria entre treball i calor té una implicació en la transferència d'energia que es dona fins i tot en condicions ideals: treball i calor no són igual d'aprofitables. I és que la termodinàmica ens diu que mai no podrem transferir la mateixa energia a través de treball que no pas a través de calor.

6.3. La idea de conservació, dissipació i aprofitament de l'energia

Abans de començar... Posa a prova les teves idees

En una avinguda urbana els cotxes avancen de manera intermitent, ja que cada cert temps cal aturar-se pels semàfors. Suposa que un cotxe accelera quan el semàfor es posa en verd, avança un cert espai i frena en arribar al semàfor següent, en vermell. Per posar el cotxe en moviment gasta una mica del combustible del dipòsit, i suposem que aquest combustible equival a 100 J d'energia.



1. On «són» aquests 100 J en l'instant que el cotxe comença a arrencar?
2. On són quan es troba movent-se, a mig camí?
3. On són quan torna a estar aturat en el semàfor següent?

Llegiu-ho després d'haver respost individualment

Si formuleu aquesta pregunta a estudiants de l'ESO, en trobareu respostes molt variades, com ara «es gasta», «es reparteix pel cotxe», «s'evapora» o «se'n va pel tub d'escapament». Un cop plantejada la discussió, és interessant incorporar noves preguntes com: hi ha cap manera de recuperar aquests 100 J d'energia, o podem dir que els hem perdut per sempre? Això permetrà començar a pensar que els 100 J ja no es poden situar físicament en un punt concret, sinó que cada vegada estan més repartits, associats a diverses variables en diferents parts del sistema.

6.3.1. Quin és el punt de partida en la idea de conservació, dissipació i aprofitament d'energia?

Potser una de les afirmacions més icòniques en l'ensenyament de l'energia és aquesta: «l'energia ni es crea ni es destrueix, només es transforma». No obstant això, a l'hora de la veritat, tots nosaltres percebem al nostre voltant que totes les coses deixen de tenir energia: les bateries es descarreguen, les persones cremen calories en fer exercici, els dipòsits de gasolina es buiden, etc. En totes aquestes situacions és fàcil percebre i imaginar que hi ha alguna cosa que no es conserva, que sí que perd capacitat o potencial de fer alguna cosa. Aquesta contradicció entre teoria i percepció ha estat estudiada per la literatura especialitzada, tant per identificar les idees alternatives com per proposar formes d'ensenyament que acostin l'estudiant al model científic escolar d'energia. Dins del ventall d'idees i concepcions alternatives, a continuació en presentem algunes de les més comunes.

a. Idees alternatives respecte de la creació d'energia

És habitual trobar explicacions espontànies i intuïtives que afirmen que l'energia es crea en centrals o en instal·lacions elèctriques. De fet, en l'àmbit industrial és comú el terme «generació d'energia», tot i que, des del model físic, s'hauria de parlar que el que fan les centrals elèctriques és aprofitar l'energia emmagatzemada en configuracions prèvies, sovint naturals: en el moviment de l'aire o l'aigua, en els enllaços químics del carboni, en els enllaços nuclears, etc. Aquesta confusió està influïda, en part, perquè en aquestes centrals sí que es genera electricitat, i també per la dificultat de pensar en l'existència d'una

configuració prèvia (recordem la idea de «funció d'estat» que hem desenvolupat més amunt) que canvia. Els estudiants saben que el Sol transfereix energia a l'aigua durant el cicle de l'aigua o transfereix energia a les plantes, que la fan servir per créixer, però poques vegades senten la necessitat de continuar pensant d'on prové aquesta energia.

Però la idea que l'energia es crea no només afecta les fonts de les quals extraïem energia. Algunes recerques clàssiques en didàctica mostren que alguns estudiants, quan expliquen el moviment d'un pèndol, afirmen que acaba amb més energia que al principi, ja que per ells en cada oscil·lació «va guanyant energia».

b. Confusió entre fonts d'energia i mecanismes que activen la transferència d'energia

En recerques fetes amb imatges sobre energia presents en llibres escolars de ciència, per demanar a diferents estudiants de secundària que narressin el que veien en aquelles imatges es va trobar que, per a alguns d'ells, la font d'energia en un procés qualsevol no era l'aprofitament d'un estat o configuració més energètic, sinó un procés d'activació mecànica realitzada per humans: «la persona que condueix, en prémer el pedal d'acceleració del cotxe, transfereix energia a les rodes», «la persona que encén la llum, en prémer l'interruptor, transfereix energia al circuit elèctric», etc. Una cosa semblant passa amb les reaccions químiques: l'espurna que encén el combustible no és la que aporta energia al sistema, sinó que l'energia ja està emmagatzemada en forma d'enllaços químics, i l'espurna l'únic que fa és activar el procés de transferència d'aquesta energia emmagatzemada. Aquesta confusió acostuma a estar influïda per la visió espontània de caràcter antropocèntric que els estudiants fan servir per a les seves explicacions dels fenòmens naturals.

c. Confusió entre formes d'energia i fonts d'energia

Una última idea errònia —i aquesta no només la tenen els alumnes, sinó fins i tot bona part del professorat— és considerar que els diferents processos físics i tecnològics propis de les diferents formes d'obtenció, d'emmagatzematge o de transferència d'energia, com ara l'energia elèctrica, lluminosa o sonora, són tipus d'energia. Els tipus d'energia realment diferents dels quals podem parlar són únicament dos: l'energia cinètica associada als sistemes en moviment o amb una certa velocitat, i l'energia potencial, associada als sistemes per les seves interaccions o forces d'atracció i repulsió. Així, l'energia elèctrica no és un tipus d'energia ontològicament diferent de les altres, sinó que pot ser la manera de referir-nos a la transferència d'energia a través d'electricitat (o treball elèctric, com hem discutit anteriorment), però també serveix per parlar de l'energia potencial emmagatzemada dins d'una configuració electrostàtica com ara un condensador o una bateria. De la mateixa manera, l'energia tèrmica no és altra cosa que l'energia associada a la temperatura i, per tant, l'energia cinètica associada a la vibració interna de les partícules dels materials. L'energia hidràulica no és més que energia associada al fet de tenir aigua a una certa alçada, l'eòlica és energia cinètica associada a l'aire que fa moure les aspes dels aerogeneradors, i l'energia mareomotriu és el mateix però associada al moviment de l'aigua del mar. A tota aquesta confusió cal afegir-hi l'ús d'altres etiquetes com «energia verda» o «energia neta» (per no parlar d'altres amb connotacions esotèriques com «energia de les piràmides» o «energia dels txakres» de les quals hem parlat abans). Atesa aquesta varietat de noms que es fa servir per caracteritzar l'energia, hi ha el risc que els estudiants a secundària associïn propietats qualitatives diferents a aquests suposats tipus d'energia (com el color o la forma de moure's), és a dir, que pensin que hi ha una mena de combustible o fluid diferent segons el tipus d'energia en comptes que hi ha una configuració o un estat diferent, al qual per brevetat posem una etiqueta descriptiva.

6.3.2. Com fem progressar la idea de conservació, dissipació i aprofitament de l'energia?

Si bé hi ha diferents maneres de construir aquest model d'energia, d'acord amb la perspectiva de la modelització que hem fet servir al llarg del llibre, creiem que és convenient que l'estudiant parteixi de la discussió de fenòmens concrets, però que permetin identificar transferències d'energia en les quals, en seguir el camí de l'energia, veiem que aquesta es va distribuint però no desapareix. A l'apartat 6.1, ja hem discutit la necessitat

que l'estudiant identifiqui canvis en l'estat dels sistemes, i en el 6.2 que podem encadenar aquests canvis. Ara es tracta de compartir les regles del joc que regulen quins canvis poden passar o no: per exemple, que pots obtenir canvis equivalents però no superiors en termes energètics als inicials (conservació) i que cada cop obtens canvis menys aprofitables (degradació de l'energia per dissipació d'aquesta), construint una visió global de què ha passat. Per fer-ho, pot ser molt útil construir les denominades cadenes energètiques, és a dir, representacions en forma de diagrama de les transferències d'energia entre les diferents parts del sistema que compleixen les dues condicions esmentades. Per fer aquestes transferències no és tan important el nom que se li posa a l'energia (si és tèrmica, elèctrica, mecànica...), sinó la variable que indica l'estat de l'objecte a què se li associa l'energia.

Per exemple, a la figura 6.6. es van fer servir representacions visuals que facilitaven que l'estudiant identifiqués els canvis en cada element per poder construir la cadena.

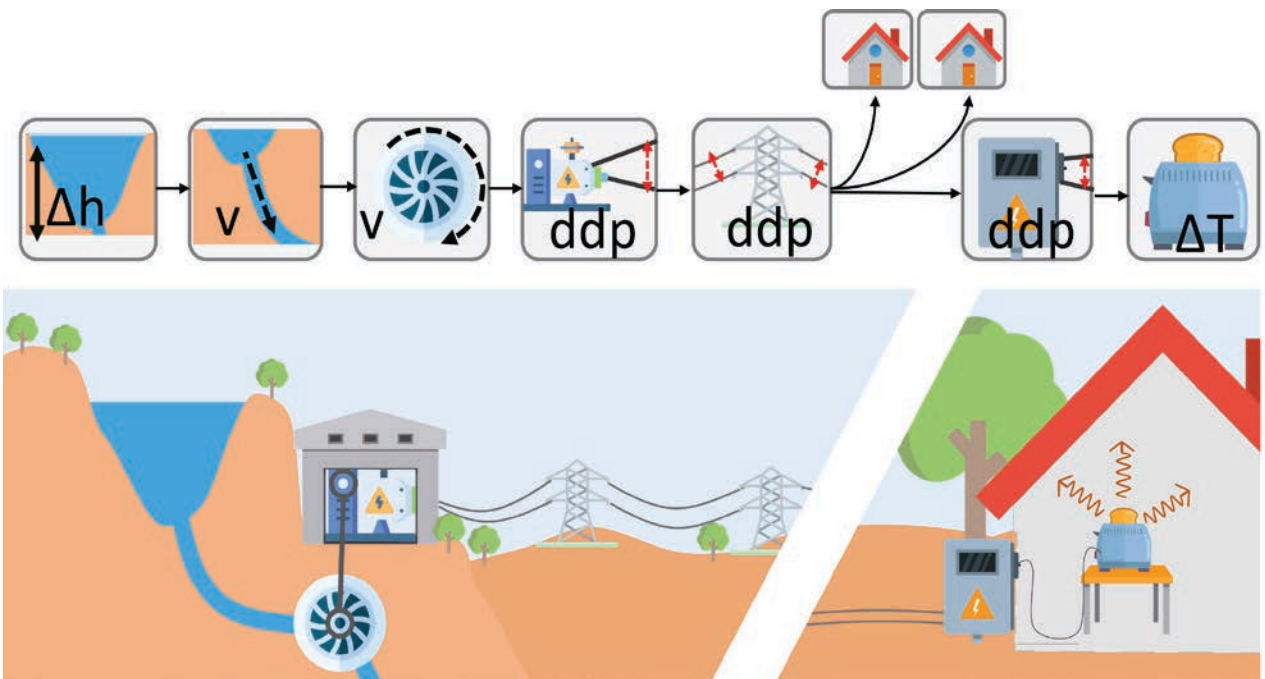


Figura 6.6. Representació d'una cadena energètica des d'una central hidroelèctrica fins a la llar, inspirada en la proposta d'Ametller i Pintó (2002).

Aquesta manera de mirar els processos ens permet construir el que podem anomenar «el camí de l'energia», que implica entendre quins canvis provoquen nous canvis, com disminueix la capacitat de produir nous canvis en cada pas del sistema i quina part de l'energia inicial es pot aprofitar en cada etapa del procés. A més, introduint el concepte de rendiment com la relació entre l'energia que es transfereix en dos processos concatenats (per exemple, suposant que del 100% d'energia que el pistó transfereix a la corda, el 80% d'energia es transfereix a la corda i l'altre 20%, a l'ambient), es poden elaborar diagrames que representin en forma de flux com l'energia s'ha repartit en el sistema.

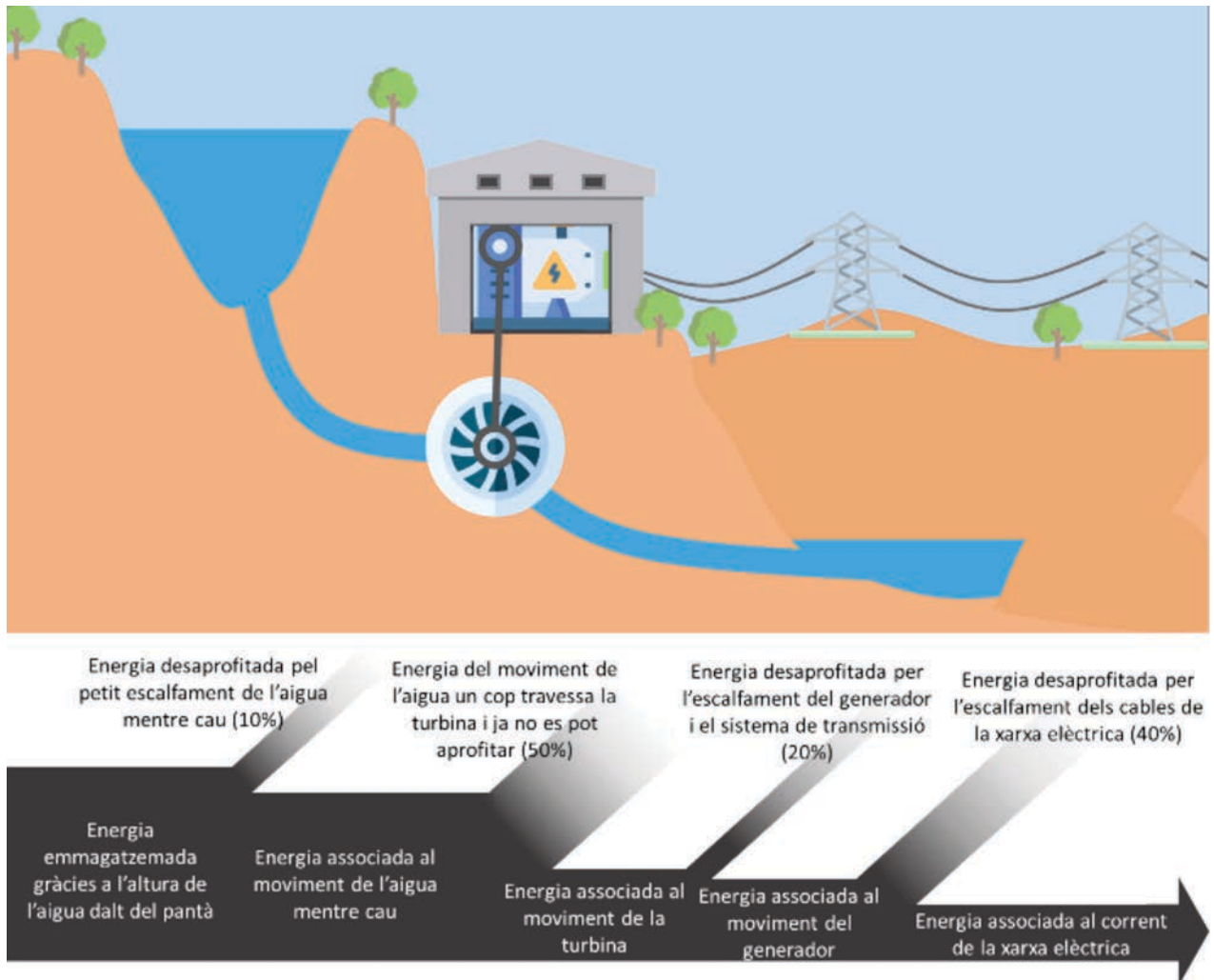


Figura 6.7. Representació del flux d'energia transferida en cada procés, inspirada en la proposta d'Ametller i Pintó (2002).

Aquesta representació com a diagrama de flux contrasta amb el fet que volem que l'energia deixi de concebre's com un fluid o combustible que resideix en els cossos. De fet, un dels reptes principals de l'ensenyament de l'energia és aquesta manca de coherència. D'una banda, intentem fer entendre als nostres estudiants que l'energia és una cosa abstracta, una entitat imaginària que fem servir per mirar i seguir la pista dels canvis en els estats dels sistemes, i que ens permet poder-los comparar sobre la base de com podem aprofitar-ne l'alçada, la velocitat, la temperatura... De l'altra, però, que per quantificar l'energia i pensar en la seva conservació i degradació, ens la imaginem amb la metàfora d'un flux que passa d'un cos a un altre i que es va repartint. En realitat, però, el que es va distribuïnt és la probabilitat de tenir una part del sistema amb una variable diferent de la del costat.

Les cadenes energètiques tenen moltes maneres d'expressar-se, com els diagrames anteriors, però també amb activitats manipulatives, com ara a través de gots d'aigua (vegeu l'activitat «Representem l'energia amb gots d'aigua i una safata»), o amb altres materials quantificables, com pedres, llegums secs, plastilina, etc. També es pot fer servir la metàfora dels diners: imagina que vas a passar el dia a una ciutat i disposes de 100 €, que gastaràs en transport, oci, menjar, compres, etc. Intenta seguir la pista dels diners, indicant on són aquests 100 € al final del dia. Això pot ajudar l'alumnat a entendre que al principi del dia aquests diners estaven concentrats en un sol lloc, mentre que al final del dia hauran quedat repartits (i més si els destinataris de part d'aquests diners decideixen, al seu torn, fer-los servir per comprar coses a tercers), i arriben a quedar tan disseminats que costa seguir-los la pista i poder fer-hi més coses.

Quan treballem amb cadenes energètiques, és molt probable que aparegui de nou la llista gairebé interminable de «tipus» d'energia que hem qüestionat anteriorment. Com hem dit abans, en aquesta llista de «cognoms» que normalment s'atribueixen a l'energia hi ha una barreja d'etiquetes que posem segons el fenomen (energia mecànica, energia elèctrica, energia lumínica, energia nuclear, etc.), segons la tecnologia d'aprofitament que es fa servir (energia eòlica, energia fotovoltaica, etc.) i segons les implicacions socials (energia verda, energia neta, etc.). Fins a quin punt cal entestar-nos que els nostres estudiants entenguin que en realitat hi ha dos tipus d'energia (energia cinètica quan l'associem al moviment i potencial quan l'associem a enllaços d'atracció i repulsió)? Això dependrà de quina aproximació es dona en cada situació d'ensenyament i aprenentatge, de quins fenòmens es trien per treballar l'energia, i de com «conviu» la física amb altres àrees del coneixement com la tecnologia o les ciències socials. El que seria convenient, com a mínim, és aclarir en algun moment que, per exemple, l'energia hidràulica no és més que l'energia potencial de l'aigua, que primer s'associa a l'alçada (energia potencial) i després al moviment (energia cinètica).

6.3.3. A quina versió de la idea de conservació, dissipació i aprofitament de l'energia volem arribar i per a què?

Conservació, degradació/dissipació i aprofitament són tres «peces» que l'alumne ha d'aprendre a encaixar en les seves descripcions energètiques dels processos, que li permeten elaborar prediccions i prendre decisions. La regla de joc principal és que la energia que guanya o perd un sistema sempre correspon a la pèrdua o el guany d'energia d'un altre sistema o de l'entorn, i, per tant, és possible seguir la pista d'una quantitat d'energia al llarg d'una sèrie de canvis encadenats. En la majoria dels casos, l'estat al qual associem energia dissipada és difícil de percebre, ja que, quan hi ha xocs, fregaments, efecte Joule, etc., es produeixen petites deformacions, sorolls, escalfaments pràcticament imperceptibles per als nostres sentits. En alguns casos, per seguir la pista de l'energia, caldria fer servir una càmera tèrmica per observar com els cossos s'escalfen lleugerament quan piquen contra un altre objecte, quan absorbeixen les vibracions d'un cop, quan freguen, etc.

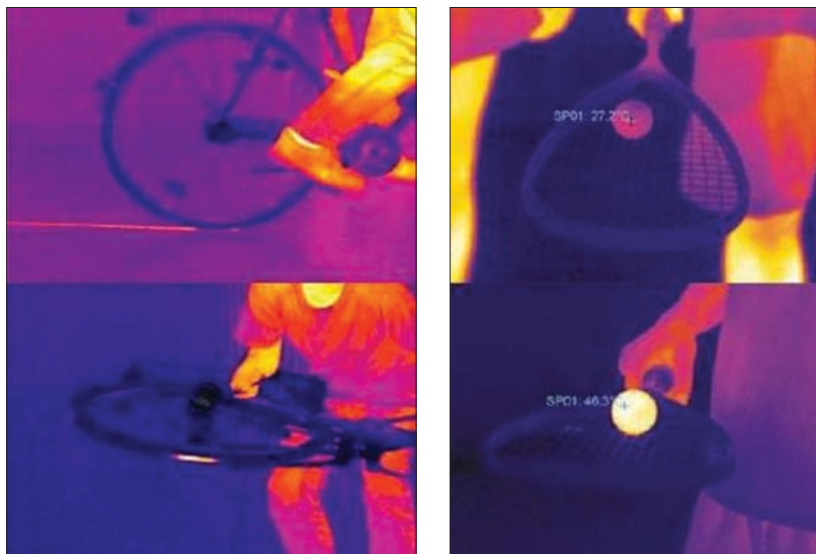


Figura 6.8. Petits escalfaments produïts a terra i a la roda durant una frenada, en una pilota de tennis després de rebotar contra la raqueta. Veure la imatge en color a la versió digital del llibre. Font: Vollmer i Möllmann (2017).

Elaborar una cadena energètica per explicar processos quotidians pot ajudar els nostres estudiants a entendre moltes de les problemàtiques associades al consum d'energia i a l'eficiència energètica en els transports, en aparells electrònics o en instal·lacions domèstiques, tenint en compte que, encara que sempre tenim

la mateixa quantitat d'energia, la qualitat en termes de quanta en podem aprofitar es va reduint en cada canvi. Al final de l'escolaritat obligatòria, un estudiant hauria de poder explicar què significa una bombeta de baix consum, i quins avantatges suposa respecte d'una de convencional, i també per què els frens regeneratius dels cotxes elèctrics (que frenen la roda amb interaccions electromagnètiques que, al seu torn, recarreguen la bateria) són més eficients que els frens mecànics que es fan servir en els cotxes convencionals. Alhora, les cadenes energètiques també permeten representar transferències d'energia en què intervé l'intercanvi d'energia associat a les xarxes tròfiques i, per tant, explicar per què alimentar-se de carn de vaca és molt menys eficient energèticament que alimentar-se directament dels cereals que serveixen per alimentar les vaques, ja que només una fracció molt petita de l'energia emmagatzemada en el cereal passa a quedar emmagatzemada en els teixits de la vaca, mentre que la resta es dissipa en els processos vitals de l'animal. La cadena energètica també permet explicar el balanç energètic de l'atmosfera i retre compte de l'escalfament global que estem vivint, com ja hem apuntat en el capítol 5 en parlar de la interacció llum-matèria.

A més, per a aquells estudiants que continuïn estudiant física en l'etapa postobligatòria, el fet d'haver construït el model de transferència d'energia els permetrà enriquir fàcilment aquest model amb la quantificació de magnituds com el rendiment o la potència.

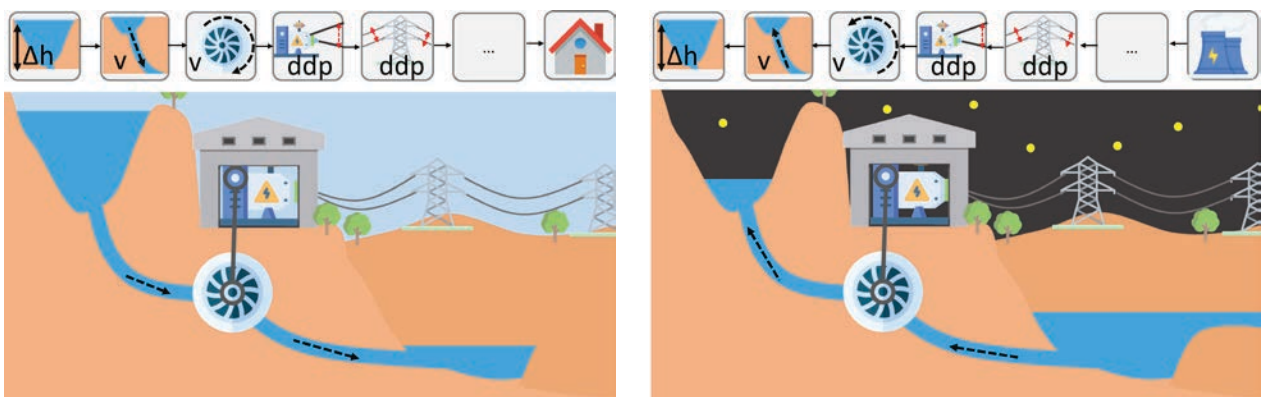


Figura 6.9. El funcionament dels embassaments és un molt bon exemple de procés d'aprofitament de l'energia, que actualment es fa servir per aprofitar l'excés d'energia produïda de nit en les centrals nuclears (que no es poden aturar) per pujar aigua de manera artificial i deixar-la caure de dia. Aquesta solució en el futur pot esdevenir clau per a la regulació del flux intermitent d'energia provinent de les centrals eòliques i fotovoltaïques. Font: elaboració pròpia.

El racó de pensar

De la termodinàmica del creixement a la termodinàmica del decreixement

Desenvolupada des de mitjan segle XVIII fins a finals del segle XIX, la termodinàmica va avançar a Occident de la mà de grans desenvolupaments tecnològics de l'època, com la màquina de vapor, la locomotora o la indústria tèxtil. Els científics havien d'entendre de quina manera es podien aprofitar millor els recursos naturals com a fonts d'energia (el carbó, els rius, el vent...) per produir canvis, és a dir, per fer moure les màquines que permetien aquell progrés. Amb el pas del temps es van idear formes cada vegada més enginyoses i eficients d'aprofitar les fonts d'energia que oferia el planeta Terra, que permetien produir més de pressa, desplaçar-se d'un lloc a un altre a més velocitat, proveir les llars d'electricitat i omplir-les cada vegada de més aparells que funcionaven gràcies a aquesta electricitat. Però a poc a poc es va veure que la capacitat del planeta per oferir recursos era limitada, i que el ritme amb què els humans consumim les fonts d'energia al nostre abast no es pot sostenir indefinidament en el temps i té efectes secundaris, com ara l'augment de gasos d'efecte d'hivernacle. Així, ens acostem irremeiablement a una crisi energètica sense precedents que s'anirà aguditzant en les pròximes dècades: el canvi climàtic i els seus efectes devastadors, la desigualtat en l'accés a les fonts d'energia i els conflictes polítics i econòmics associats al control i la gestió de l'energia.

L'ensenyament de la termodinàmica a l'ESO ha de contribuir a l'alfabetització i la competència científica dels estudiants que, independentment dels seus estudis postobligatoris, seran els futurs ciutadans que en les properes dècades s'hauran d'enfrontar a qüestions que avui no estan ni molt menys resoltes, com l'obtenció sostenible i segura d'energia, l'emmagatzematge eficient d'aquesta i la seva distribució de manera equitativa. Per tant, la qüestió ja no és tant si entenen la màquina de vapor ni les parts d'una central elèctrica, sinó quines implicacions té cada tipus de tecnologia en l'entorn, com es poden desenvolupar maneres de reduir el consum energètic i la dependència dels combustibles fòssils, quins aspectes de la nostra vida actual cal canviar per adaptar-nos a una era posterior a la dels combustibles fòssils, que, un cop esgotats, mai més no tornaran a estar disponibles.

Per saber-ne més: López-Simó i Couso (2022).

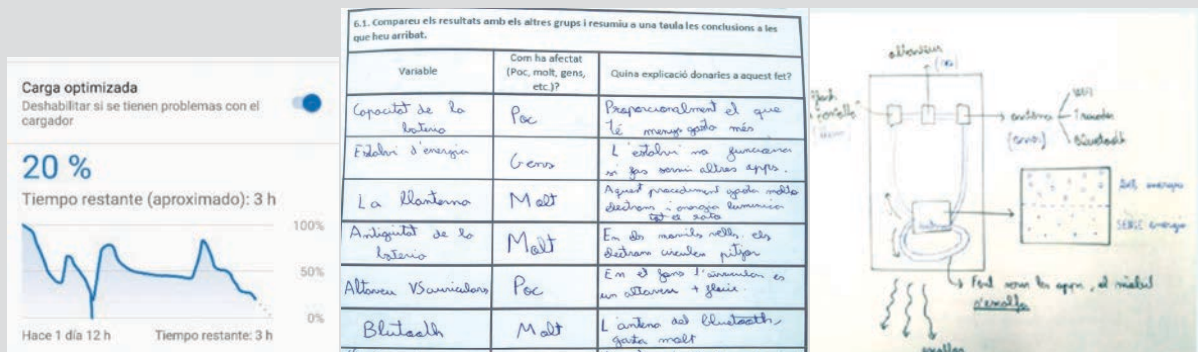
ENSENYAR ENERGIA MITJANÇANT ABP

Com podem estalviar energia amb la bateria del mòbil?

Les gràfiques de càrrega de la bateria del mòbil en funció del temps són un bon recurs per involucrar l'alumnat en experiments per comparar com de ràpid es redueix aquesta càrrega en funció de l'ús que es fa del mòbil.

Al principi del projecte, es proposa a l'alumnat que pensi en com diferents factors afecten la variació del nivell de càrrega del seu mòbil, ja que és una manera molt simple i intuïtiva de mesurar la quantitat d'energia que hi ha emmagatzemada al mòbil i quanta s'ha gastat amb els processos de funcionament del mòbil. Poden pensar en quina és la freqüència amb la qual utilitzen les aplicacions comercials, en quina és la configuració del dispositiu respecte de la intensitat del so, la brillantor de pantalla o el consum de dades, i també altres variables com el tipus de bateria o el nivell inicial de càrrega.

Així, després d'expressar les seves idees inicials sobre els fenòmens elèctrics i energètics involucrats en la càrrega i descàrrega, es demana a l'alumnat que dissenyi un o diversos experiments en què compari la rapidesa amb què es descarrega la bateria en diferents situacions. Aquests experiments tenen una durada indeterminada, de manera que poden pensar en experiments curts que puguin fer durant una hora de classe, o bé experiments que durin vint-i-quatre hores seguides o fins i tot més. Per exemple, poden comparar què passa si durant tot un dia fan servir el mòbil amb la brillantor de la pantalla al màxim, i un altre dia amb la brillantor al mínim, o comparar si es gasta més energia fent servir auriculars de cable o altaveu per sentir música, si tenir aplicacions en segon pla afecta el consum d'energia, o mesurar quan s'escalfa, etc. En qualsevol dels casos, l'alumnat haurà de dissenyar bons experiments on les variables dependents e independents estiguin degudament identificades i hi hagi control de variables, evitant modificar dues variables alhora o trobar correlacions espúries.



Al final del projecte, l'alumnat ha de presentar individualment o en petits grups el resultat de la seva recerca, per acabar ordenant conjuntament quins aspectes del funcionament del mòbil impliquen una major despesa energètica. Aquestes exploracions del fenomen posteriorment es poden transferir a altres contextos per parlar de l'eficiència energètica d'altres aparells elèctrics i electrònics, i relacionar-se amb com és l'energia i com en són les transferències per tal que el mòbil es comporti així.

Per saber-ne més: López-Simó, Herreras, Grimalt-Álvaro, Hernández (2020). Pràcticas científicas en la ESO con la batería del móvil. *Aula de Secundaria*, 35, 29-34.

Bibliografia clàssica de referència sobre energia:

- BOOHAN, R.; OGBORN, J. (1996). *Energy and Change. Introducing a new approach. Activities for the classroom. Background stories for teachers*. Hatfield: Association for Science Education.
- DOMÉNECH, J. L.; GIL-PÉREZ, D.; MARTÍNEZ-TORREGROSA, J.; GRAS, A.; GUIASOLA, G.; SALINAS, J. (2001). La enseñanza de la energía en la educación secundaria. Un análisis crítico. *Revista de Enseñanza de la Física*, 14 (1), 45-60.
- DUIT, R. (1987). Should energy be introduced as something quasi-material? *International Journal of Science Education*, 9, 139-145.
- OGBORN, J. (1986). Energy and fuel – the meaning of the ‘go’ of things. *School Science Review*, 68 (242), 30-35.
- SOLOMON, J. (1985). Teaching the conservation of energy. *Physics Education*, 20 (4), 165-70.

Referències bibliogràfiques

- ALONSO, M. (2015). Debate histórico sobre la naturaleza de la luz. Sección Local de la Real Sociedad Española de Física.
- AMETLLER, J.; PINTÓ, R. (2002). Students' reading of innovative images of energy at secondary school level. *International Journal of Science Education*, 24 (3), 285-312.
- BESSON, U. (2001). Une approche mésoscopique pour l'enseignement de la statique des fluides. Étude des raisonnements des apprenants, élaboration et expérimentation d'une séquence d'enseignement. Ph.D. Thesis. University of Paris 7 Denis Diderot.
- BESSON, U.; VIENNOT, L. (2004). Using models at the mesoscopic scale in teaching physics: Two experimental interventions in solid friction and fluid statics. *International Journal of Science Education*, 26 (9), 1083-1110.
- CARRASCOSA, J. (2006). El problema de las concepciones alternativas en la actualidad (parte III). Utilización didáctica de los errores conceptuales que aparecen en cómics, prensa, novelas y libros de texto. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 3 (1), 77-88.
- CARRASCOSA-ALÍS, J.; PERALES, E.; REY, A.; ROMERO; ROSA, S. (2017). La enseñanza de las fuerzas: Dificultades y orientaciones en secundaria. *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 89, 7-13.
- DOMÈNECH-CASAL, J.; GASCO, J.; ROYO, P.; VILCHES, S. (2018). Proyecto CRASH: enseñando cinemática y dinámica en el contexto del análisis pericial de accidentes. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 15 (2), 210301-210317.
- GAGLIARDI, M.; GALLINA, G.; Guidoni, P.; Piscitelli, S. *Forze, deformazioni, movimento*. Torí: Emme, 1989.
- GARCIA-LLADÓ, À.; LÓPEZ, V. (2020). Beyond Recurring Free-Body Force Diagrams: Educational Pros and Cons of Alternative Means of Representing Forces and Interactions. *The Physics Teacher*, 58 (7), 504-508.
- GARRIDO, N.; LÓPEZ, V.; PINTÓ, R. (2019). Analysis of the learning of electrostatic concepts in pre-service physics teachers. *Journal of Physics: Conference Series* 1287(1), 012034. IOP Publishing.
- GIERE, R. N.; BICKLE, J.; MAULDIN, R. F. (1991). *Understanding scientific reasoning*. Wadsworth Publishing Company.
- GIORDAN, A. (1993). *La enseñanza de las ciencias*. Siglo XXI.
- HERNÁNDEZ, M. I.; COUSO, D.; PINTÓ, R. (2012). The analysis of students' conceptions as a support for designing a teaching/learning sequence on the acoustic properties of materials. *Journal of Science Education and Technology*, 21, 702-712.
- HERRERAS BLANCO, L.; GARRIDO ESPEJA, A.; PINTÓ, R. (2016). Regulació de la temperatura dels animals. Seqüència didàctica per a l'estudi de la termoregulació animal i les adaptacions.
- HREPIC, Z. (2010). *Nature of Sound Propagation: Naive, Scientific and Experimental*.
- JIMÉNEZ PERALES, F. J. (2001). Graphic representation of force in secondary education: Analysis and alternative educational proposals. *Phys. Educ.* 36, 227-235.
- JOHNSTONE, A. H. (1991). Why is science difficult to learn? Things are seldom what they seem. *Journal of Computer Assisted Learning*, 7 (2), 75-83.
- LÓPEZ-SIMÓ, V.; PINTO, R. (2017). Identifying secondary-school students' difficulties when reading visual representations displayed in physics simulations. *International Journal of Science Education*, 39 (10), 1353-1380.
- LÓPEZ-SIMÓ, V.; HERRERAS, L.; GRIMALT-ÁLVARO, C.; HERNÁNDEZ, M. I. (2020). Prácticas científicas con la batería del móvil. *Aula de Secundaria*, 6, 29-34.

- LÓPEZ-SIMÓ, V.; GRIMALT-ÁLVARO, C.; COUSO, D. (2018). ¿Cómo ayuda la pizarra digital interactiva (PDI) a la hora de promover prácticas de indagación y modelización en el aula de ciencias? *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 15 (3), 330201-330215.
- LÓPEZ-SIMÓ, V. (2018). Estudi de la llei de Faraday-Lenz fent servir el mòbil i el sensor de voltatge. *Ciències*, 35, 17-21.
- LÓPEZ-SIMÓ, V.; COUSO, D. (2022). *El currículum operatiu de l'energia*. Institut Català de l'Energia
- LÓPEZ-SIMÓ, V.; FERRER SÁNCHEZ, D. (2021). Análisis del uso de un simulador de colisiones para resolver un accidente de tráfico. *Enseñanza de las Ciencias*, 39 (3), 0051-70.
- LOPEZ-SIMÓ, V.; HERNÁNDEZ, M. I. (2015). Scratch as a computational modelling tool for teaching physics. *Physics Education*, 50 (3), 310.
- LÓPEZ-SIMÓ, V. (2021): App Checkers, un proyecto de verificación de la fiabilidad de una aplicación móvil. *Aula de Secundaria*, 44, 37-42.
- NUSSBAUM, J.; NOVAK, J. (1976). An assessment of children's concepts of the earth utilizing structured interviews. *Science Education*, 60 (4), 535-550.
- OSBORNE, J. (2014). Teaching scientific practices: Meeting the challenge of change. *Journal of Science Teacher Education*, 25 (2), 177-196.
- OSUNA, L.; MARTÍNEZ-TORREGROSA, J.; CARRASCOSA, J.; VERDÚ, R. (2007). Planificando la enseñanza problematizada: el ejemplo de la óptica geométrica en educación secundaria. *Enseñanza de las Ciencias*, 25 (2), 277-294.
- PAREJO, L. (2022). La progressió de l'aprenentatge de l'alumnat de tercer de secundària durant la implementació d'una unitat didàctica sobre la interacció llum-matèria en el context de l'efecte d'hivernacle. Treball de final de màster.
- PINTÓ, R.; COUSO, D.; HERNÁNDEZ, M. I. (2010). Les propietats electromagnètiques dels materials. Materials Science Project.
- (2010). Les propietats acústiques dels materials. Materials Science Project.
- SOLBES, J.; PINA, T. (2021). Modelización de la propagación de ondas con corporeización. *Alambique: Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 105, 24-30.
- SOTO, M.; COUSO, D.; LÓPEZ, V. (2019). Una propuesta de enseñanza-aprendizaje centrada en el análisis del camino de la energía «paso a paso». *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 16 (1), 1202-1202.
- TORRES CLIMENT, À. L. (2016). Tractament d'idees alternatives de física en educació secundària. *Ciències: Revista del Professorat de Ciències de Primària i Secundària*, 31, 0007-11.
- VERGARA; LÓPEZ; COUSO (2021). Análisis de la interacción profesor-alumno en el contexto de actividades de modelización con estudiantes de física de bachillerato. 29 Encuentros de Didáctica de las Ciencias Experimentales, 222-230.
- VIENNOT, L. (2003). *Teaching physics*. Springer Science & Business Media.
- (1996). *Reasoning in physics: The part of common sense*. Springer Science & Business Media.
- VOLLMER, M.; MÖLLMANN, K. P. (2017). *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*. 2a ed. Wiley-VCH.

VÍCTOR LÓPEZ-SIMÓ és llicenciat en Física (2009) i doctor en Didàctica de les Ciències (2014). Ha treballat com a professor de física i química a ESO i Batxillerat, i actualment és professor del Departament de Didàctica de la Matemàtica i de les Ciències Experimentals de la UAB, on imparteix classes de Didàctica de les Ciències al professorat en formació de primària i secundària. La seva recerca s'ha centrat en la comprensió conceptual de la física i la química, així com en l'ús d'eines digitals per a l'ensenyament de les ciències, com ara sensors i simulacions.

DIGNA COUSO és llicenciada en Física (1999) i doctora en Didàctica de les Ciències (2009). Ha estat la directora del CRECIM (Centre de Recerca per a l'Educació Científica i Matemàtica) i actualment és la investigadora principal del grup de recerca ACELEC (Aprentatge Científic Escolar: Llenguatges, Eines i Contextos). Ha participat i liderat múltiples projectes de recerca sobre ensenyament i aprenentatge de les ciències i de l'àmbit STEM, abordant qüestions com el posicionament dels joves envers la ciència, el disseny de situacions d'aprenentatge que promoguin les pràctiques científiques d'investigació i modelització o el pensament crític a l'aula de ciències.

Quines són les idees clau de la física que cal que l'alumnat aprengui durant la seva educació secundària obligatòria? Per què és important aprendre aquestes idees? Què fa que costi tant que l'alumnat les construeixi amb sentit? Quines estratègies i quins recursos docents poden ajudar en aquesta tasca?

Amb aquest manual volem compartir visions, recursos i experiències per a un ensenyament de la física orientat a la comprensió conceptual (posant èmfasi a entendre les idees i no només a memoritzar equacions i procediments) d'arrel constructivista (partint sempre del que l'alumne ja sap i realment pensa), amb voluntat fenomenològica (enfrentant constantment l'alumnat amb fenòmens quotidians o propers) i de naturalesa dialògica (entenen que aprendre ciències vol dir parlar i compartir significats en comunitat).

Esperem que sigui d'utilitat tant per a docents en formació com per a docents en actiu i altres professionals de l'educació i la divulgació científica.