



Universidad de Alicante

Investigación y Propuestas Innovadoras de Redes UA para la Mejora Docente

Coordinadores

José Daniel Álvarez Teruel
María Teresa Tortosa Ybáñez
Neus Pellín Buades

© **Del texto: los autores**

© **De esta edición:**

Universidad de Alicante
Vicerrectorado de Estudios, Formación y Calidad
Instituto de Ciencias de la Educación (ICE)

ISBN: 978-84-617-3914-1

Revisión y maquetación: Neus Pellín Buades

Experiències senzilles de física recreativa: flascó de Mariotte, refracció de la llum i tira d'alumini ondulant

I. Abril¹, V. Esteve¹, P. de Vera¹, J. Martínez Asencio¹,
W. Dednam^{1,2}, R. Garcia-Molina³

¹*Departament de Física Aplicada, Universitat d'Alacant, E-03080 Alacant, Spain*

²*Department of Physics, Science Campus, University of South Africa, Private Bag X6,
Florida Park 1710, South Africa*

³*Departamento de Física - Centro de Investigación en Óptica y Nanofísica,
Regional Campus of International Excellence "Campus Mare Nostrum",
Universidad de Murcia, E-30100 Murcia, Spain*

RESUM

En aquest treball presentem una sèrie d'experiments senzills i estimulants de física que resulten útils per a reforçar els coneixements propis d'aquesta matèria, consolidar conceptes físics, captar l'atenció dels estudiants i fomentar-ne l'interès per la matèria de física. En aquesta ocasió hem dissenyat i dut a terme experiències de diversos camps de la Física, com ara fluids (flascó de Mariotte), òptica (refracció de la llum) i magnetisme (tira d'alumini ondulant a causa d'un camp magnètic). Amb aquest tipus d'experiments simples volem augmentar la motivació dels estudiants cap a la matèria de física, ja que l'objectiu d'aquestes experiències és tractar d'entendre el fenomen que s'està observant, en comptes d'obtenir i tractar dades. Aquests experiments estan adreçats als estudiants dels primers cursos dels graus de ciències i de les diverses enginyeries. Aquesta manera d'introduir conceptes de física mitjançant experiments sorprenents fa que l'aprenentatge resulte més significatiu, i constitueixen una eina pedagògica de gran ajuda en el procés d'ensenyament-aprenentatge de la física.

Paraules clau: física, física recreativa, experiments senzills, conceptes físics, recursos didàctics.

1.- INTRODUCCIÓ

La realització de treballs experimentals és imprescindible per a construir i avançar en el coneixement científic. Els experiments ofereixen les bases per a la construcció de la ciència i, a més a més, es converteixen en els principals arbitres de la seua validesa. Sense experiments resulta pràcticament impossible concebre la ciència moderna. Feynman deia que “El principi de la ciència, quasi la definició, és el següent: la prova de tot el coneixement és l’experiment. L’experiment és l’únic jutge de la veritat científica” [Feynman 1998].

En aquest treball utilitzarem la realització d’experiments de física, per part de l’alumnat, per a fomentar el seu interès per aquesta matèria. Pretenem que els estudiants tinguen un paper actiu en la realització d’aquests experiments, que siguen capaços de plantejar les seues idees i hipòtesis sobre el funcionament i l’explicació de cada experiment i que contrasten les seues conjectures amb la realitat. D’aquesta manera, l’estudiant passarà a tenir un paper actiu dins del procés i la implicació redundarà en un major interès pels conceptes involucrats en cada experiment; a més d’avaluar els seus coneixements científics en abordar cada activitat [Michel Sandoval *et al.* 2014].

Hem de recordar que molts dels nostres alumnes arriben a la universitat sense haver cursat l’assignatura de Física en el segon curs de batxillerat i, per tant, amb una manca molt important quant a conceptes bàsics d’aquesta matèria. Encara que en les classes de teoria el professorat exposa els coneixements que han de ser assimilats pels estudiants, moltes vegades hi ha un dèficit en aquesta comunicació, ja que el paper de l’alumnat és passiu i només se centra a prendre apunts sense entendre sovint els conceptes i les idees presentats a classe. Per tot això, pensem que la realització d’experiments senzills, i moltes vegades sorprenents, pot ajudar els estudiants a descobrir fenòmens aliens a les seues experiències prèvies i formular hipòtesis que els expliquen, a comprovar la veracitat del plantejament de les seues idees i determinar la validesa de l’explicació amb els conceptes científics reconeguts com vàlids.

Plantegem despertar l’interès, la curiositat i la motivació dels estudiants cap a la física, mitjançant la realització d’experiments i que els estudiants vulguen conèixer i aprendre, la qual cosa és clau per a tenir èxit en el procés d’ensenyament–aprenentatge i que aquest perdure en el temps [Caamaño 1992]. Així els estudiants s’implicaran activament en aquest procés d’aprenentatge i de formació científica, la qual cosa ens permetrà consolidar conceptes de física general.

En aquest treball proposem la utilització d'experiències de física recreativa com a recurs pedagògic per a introduir nous conceptes i discutir fenòmens físics des d'una perspectiva diferent a la tradicional [Garcia Molina 2011]. D'aquesta manera ens basarem en experiències senzilles, i alhora sorprenents, per a despertar l'interès dels estudiants i reforçar actituds favorables cap a la matèria de física. A més a més, com que en aquestes experiències no cal prendre i analitzar dades numèriques, tota l'atenció de l'estudiant se centrarà a recolzar els conceptes de física, aprofundir en el coneixement d'algun fenomen concret o il·lustrar algun aspecte teòric [Hoffmann *et al.* 2009]. Aquests experiments que presentem s'han dissenyat i realitzat al Departament de Física Aplicada de la Universitat d'Alacant.

2.- EXPERIÈNCIES DE FÍSICA RECREATIVA

Seguidament presentem tres experiències de física: el flascó de Mariotte (fluids), la refracció de la llum (òptica) i la tira d'alumini ondulant (magnetisme). Per a cada experiment indiquem els objectius que es persegueixen, les paraules clau, el material necessari, l'explicació i les fotografies descriptives de l'activitat, a més del fonament teòric en què estan basats i els conceptes físics que es pretenen recolzar amb la proposta docent.

2.1. Flascó de Mariotte

Objectiu: Construcció d'un dispositiu capaç de lliurar un cabal constant i regulable de líquid. Es demostraran diversos fenòmens relacionats amb la pressió hidrostàtica i el moviment de fluids. S'il·lustraran i aplicaran les equacions de Bernoulli i de Torricelli.

Paraules clau: Pressió hidrostàtica; moviment de fluids; flux continu; equació de Bernoulli; principi de Torricelli.

Materials: Botella de plàstic de 2 litres (preferiblement de parets llises), tres taps que s'hi ajusten, dues canyetes de plàstic, instrument per a foradar, pegament, cel·lofana.

Descripció: Un flascó de Mariotte consisteix en un dipòsit que done un cabal d'aigua constant i regulable. Si agafem una botella, li fem un forat i la omplim d'aigua, d'acord amb el principi de Torricelli la velocitat d'un doll d'aigua depèn de la diferència d'altura entre l'eixida del doll i el nivell superior d'aigua en el dipòsit. Per tant, a mesura que el dipòsit es buida i disminueix l'altura de l'aigua, la velocitat del doll també disminueix, i el cabal d'aigua no serà constant.

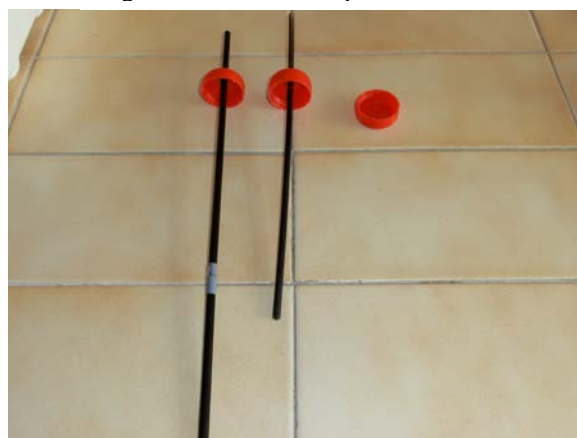
Per a construir el flascó de Mariotte, agafem la botella de plàstic i li fem dos forats petits a diferents altures de la botella, l'un a la part de baix i l'altre a la part superior o a

mitjana altura. És convenient que la distància entre els forats siga la major possible (vegeu figura 1.1). Tapem els dos forats amb cel·lofana. Agafem un dels taps i li fem un forat, de manera que la canyeta pugui travessar el tap, però que quede ben ajustada, sense espai per on passe l'aire. Una vegada s'ha introduït la canyeta al tap, comprovem que l'extrem inferior de la canyeta queda entre els dos forats quan és dins del flascó, però a una certa altura sobre el forat de baix. Llavors enganxem la canyeta al tap, de manera que l'aire no pugui penetrar a través de la unió (fig. 1.2). Una vegada que tot això està preparat, omplim la botella amb aigua i deixem una petita cambra d'aire al damunt.

Fig. 1.1.- Muntatge experimental.



Fig. 1.2.- Detall dels taps de la botella.

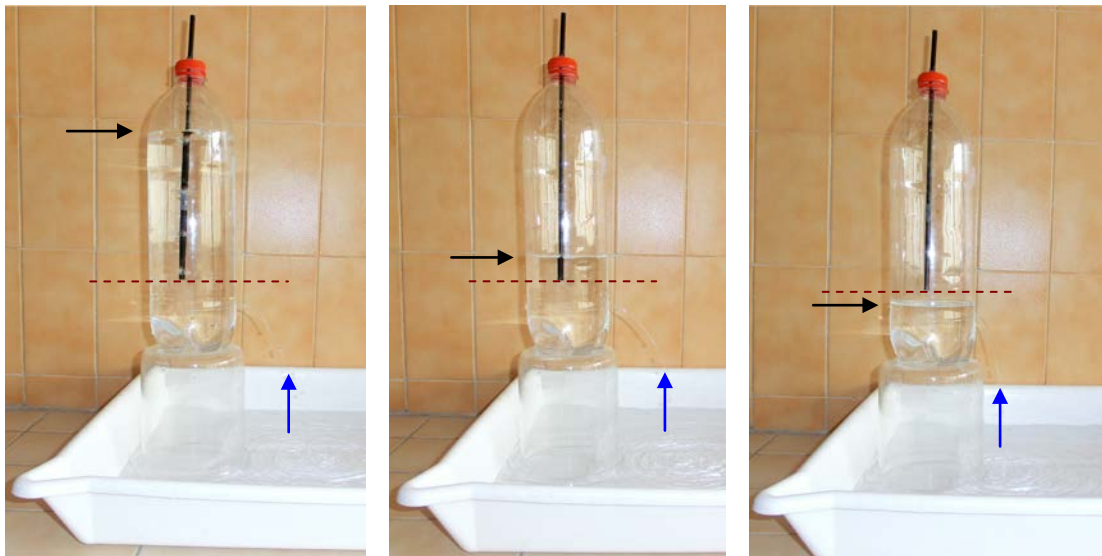


Com a primera experiència, deixem damunt d'una safra (o una pica l'aigua) el flascó sense tancar, tal com mostrem en la figura 1.1, i obrim els dos forats de la botella. L'aigua eixirà pels dos forats i comprovarem que la velocitat d'eixida del doll de dalt és menor que la del doll de baix i que les velocitats dels dos dolls disminueixen a mesura que l'altura de l'aigua en el dipòsit baixa, la qual cosa es pot comprovar veient que cada doll arriba menys lluny amb el temps.

Després, tapem els dos forats amb cel·lofana, omplim de nou el flascó amb aigua i el tanquem amb el tap que no està foradat. Si ara obrim qualsevol dels dos forats, observarem que no ix aigua. A continuació, tornem a tapar els forats de la botella, omplim la botella d'aigua i tanquem el flascó amb un dels taps travessats amb la canyeta. A la figura 1.3, on mostrem el funcionament del flascó de Mariotte, hem representat el nivell de l'aigua en la botella amb una fletxa negra, el lloc on arriba el doll d'aigua amb una fletxa blava i el nivell de l'extrem inferior de la canyeta amb unes ratlletes roges. Si ara obrim el forat de baix, observarem que ix un doll d'aigua al mateix temps que comencen a eixir bombolles per la

canyeta. En aquest cas veurem que la velocitat del doll és constant i independent de l'altura de l'aigua del dipòsit durant el temps que està per damunt de l'extrem inferior de la canyeta, tal i com es mostra a la figura 1.3. La velocitat del doll d'aigua depèn de la diferència d'altura entre l'extrem inferior de la canyeta i el forat de davall de la botella, la qual cosa podem comprovar emprant els dos taps amb la canyeta a diferent altura.

Fig.1.3.- Funcionament del flascó de Mariotte.



Si mentre ix el doll d'aigua pel forat de baix obrim el forat de dalt, comprovarem que no sols no ix aigua per aquest, sinó que, a més, l'aire comença a entrar per aquest forat superior, la qual cosa és sorprenent i antiintuitiva. Veurem també que en aquest cas, la velocitat del doll d'aigua en el forat de baix augmenta.

A més de les aplicacions didàctiques per a estudiar fluids en moviment, el flascó de Mariotte va tenir aplicacions útils, ja que va ser utilitzat des del segle XIX en llums d'oli per a evitar salts abruptes de l'oli [Maroto *et al.* 2002].

Fonament teòric: Per a entendre tot el que ocorre en aquesta experiència, primer hem de deduir el principi de Torricelli, que relaciona la velocitat d'eixida d'un fluid per un doll amb l'altura del líquid en la botella. Aquest es dedueix de l'equació de Bernoulli [Tipler i Mosca 2012] per a fluids no viscosos, i estableix la conservació de l'energia mecànica en un fluid: $E_{p,1} + E_{c,1} = E_{p,2} + E_{c,2}$, on E_p i E_c representen l'energia potencial i cinètica, respectivament, als punts 1 i 2. Si agafem una porció d'un tub de fluid de massa m que es mou amb velocitat

v , l'energia cinètica és $E_c = mv^2 / 2$, i l'energia potencial, $E_p = F dx$, on F és la força exercida sobre la porció de fluid desplaçat una distància dx . Com que la força F està relacionada amb la pressió P per $F = PA$, on A és la secció transversal de la porció de fluid, ens queda que $E_p = P Adx = PV = Pm / \rho$, on V és el volum de la porció de fluid i ρ la seua densitat. Substituint tot això en l'equació de conservació de l'energia mecànica obtenim l'equació de Bernoulli:

$$m \frac{P_1}{\rho} + \frac{1}{2} mv_1^2 = m \frac{P_2}{\rho} + \frac{1}{2} mv_2^2 \quad \rightarrow \quad P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (1-1)$$

Tenint en compte que la pressió d'una columna de fluid és $P = P_{\text{atm}} + \rho gh$, on h és l'altura de la columna de fluid, P_{atm} és la pressió atmosfèrica i g és l'acceleració deguda a la gravetat, ens queda

$$(P_{\text{atm}} + \rho gh_1) + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = (P_{\text{atm}} + \rho gh_2) + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (1-2)$$

Si agafem el punt 1 del fluid com la superfície de l'aigua dins del flascó obert, tenim que $P_1 = P_{\text{atm}}$. Considerarem aquest punt com l'origen de les altures, $h_1 = 0$. El punt 2 pot ser un dels forats al flascó, que es troba a una profunditat $-h_2$ respecte a la superfície de l'aigua, amb una pressió $P_2 = P_{\text{atm}} - \rho gh_2$. Per tant, l'equació de Bernoulli (1-2) ens quedarà

$$P_{\text{atm}} + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_{\text{atm}} - \rho gh_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2. \quad (1-3)$$

Per un altre costat, l'equació de continuïtat, basada en la conservació de la massa de fluid, ens diu que el cabal és constant i es verifica que $A_1 v_1 = A_2 v_2$. En aquest cas la superfície A_1 de l'aigua en la botella és molt més gran que l'àrea del forat A_2 , és a dir, $A_1 \gg A_2$, la qual cosa ens permet deduir que la velocitat de l'aigua pel forat és molt més gran que la velocitat v_1 amb què es desplaça la superfície del líquid. Si suposem que $v_1 \approx 0$, ens quedarà que la velocitat de l'aigua que ix pel forat val

$$v_2 = \sqrt{2gh_2}, \quad (1-4)$$

que és el principi de Torricelli [Tipler i Mosca 2012]. Aquest principi explica per què quan es van obrir els dos forats amb la botella oberta, l'aigua del doll que ix pel forat superior tenia menys velocitat que l'aigua que ix pel doll del forat inferior, tal com mostra a la figura 1.1.

També justifica per què el cabal d'aigua disminueix a mesura que el nivell de líquid descendeix en la botella.

Quan la botella està tancada el que ocorre és que quan el líquid intenta eixir pel forat, la pressió a la cambra superior d'aire disminueix i, per tant, la pressió dins del flascó acaba sent menor que l'atmosfèrica, motiu pel qual l'aigua no pot eixir pel forat.

Què ocorre quan muntem el flascó de Mariotte amb el tap travessat per la canyeta? En aquest cas, com que l'aigua ix pel forat de baix, la pressió dins del flascó comença a disminuir, de manera que la pressió atmosfèrica en la canyeta espenta l'aigua cap a dins. Finalment, l'aire arriba al final de la canyeta i comença a bombollejar. En aquest moment, la pressió a l'extrem inferior de la canyeta és P_{atm} i, per tant, la velocitat del doll al forat de davall solament depèn de la diferència d'altura entre el final de la canyeta i el forat, que és constant (fins que el nivell de l'aigua cau per davall del nivell de la canyeta).

Seguint el mateix raonament, podem veure que, si la pressió al final de la canyeta és P_{atm} , la pressió al forat de dalt és menor que P_{atm} . Per això, quan obrim el forat de dalt, l'aigua no pot escapar i, a més, l'aire comença a entrar-hi. En aquest moment, la pressió al forat de dalt s'igualava a P_{atm} , motiu pel qual ara la velocitat del doll del forat inferior depèn de la diferència d'altures entre els dos forats, que és més gran que abans i, per tant, augmenta la velocitat d'eixida de l'aigua pel forat inferior [Kires 2006].

Conceptes que cal reforçar o consolidar: Pressió hidrostàtica, fluid en moviment, equació de Bernoulli, principi de Torricelli.

2.2. Refracció de la llum

Objectiu: Visualitzar en una dissolució col·loïdal el fenomen de la refracció o desviació de la trajectòria de la llum, que té lloc quan travessa dos medis amb propietats òptiques diferents. A més, també estudiarem el fenomen de la reflexió interna total.

Paraules clau: Òptica, llei de Snell, índex de refracció, refracció de la llum, reflexió interna total, angle límit, dissolució col·loïdal, efecte Tyndall.

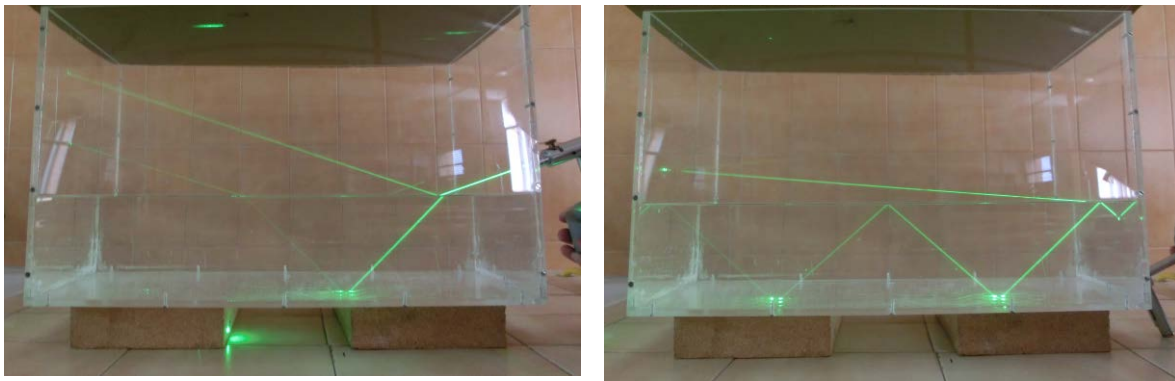
Materials: Recipient transparent, aigua, unes gotes de llet, punter làser, encens, vas de precipitat, vareta metàl·lica i de vidre pyrex, oli de bebè, capil·lar, boletes de gel.

Descripció: Agafem el recipient transparent, preferiblement de vidre, i l'omplim d'aigua fins a la meitat del volum aproximadament. Seguidament, preparem una dissolució col·loïdal, afegint unes quantes gotes de llet a l'aigua i removem perquè la mescla siga com més

homogènia millor. A més, cremarem encens i el fum omplirà el volum d'aire restant del recipient. Per últim, taparem el recipient per a evitar que se n'isca el fum.

En aquest experiment podem col·locar el punter làser en dues configuracions diferents: o bé que travesse primer el fum i després l'aigua amb la llet, o bé que primer travesse l'aigua amb la llet i després el volum d'aire que conté l'encens (figura 2.1). Gràcies a les partícules en suspensió en els dos fluids (gotes de llet en l'aigua i fum en l'aire) la llum del làser que les travessa experimenta un fenomen de dispersió. D'aquesta manera, podem veure tota la trajectòria que recorre la llum del làser quan passa per l'interior del recipient.

Fig.2.1.- Realització de l'experiment. En la imatge de l'esquerra, el làser incideix primer en l'aire i després en l'aigua, mentre que en la imatge de la dreta és a l'inrevés, primer incideix en l'aigua i després en l'aire.

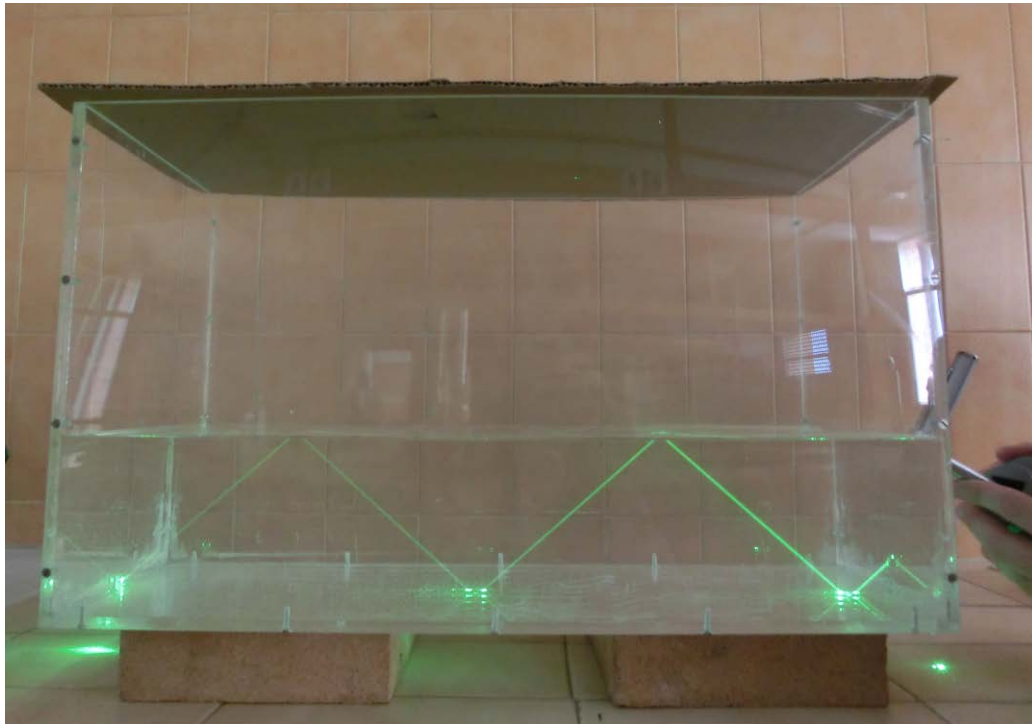


Tal com podem apreciar en la figura 2.1, segons siga la configuració que triem de la incidència del làser, els resultats poden tenir implicacions físiques molt diferents. En el primer cas (el làser incideix primer en l'aire i després en l'aigua), veiem que quan la llum del làser arriba a la interfície aire-aigua es divideix en dos rajos: l'un es reflecteix en la superfície de l'aigua i l'altre és transmès fins al fons del recipient. Aquest últim raig rebota en el fons del recipient i de nou, quan arriba a la interfície aigua-aire, queda dividit en dos: un raig que es reflecteix i que torna cap al fons del recipient i un altre raig que emergeix del líquid. Podem observar que els rajos que travessen el volum amb aire són paral·lels entre ells i, a més, els rajos que incideixen sobre una interfície i els posteriorment reflectits subtendeixen el mateix angle sobre la superfície.

En el segon cas, quan el làser incideix primer en l'aigua i després en l'aire, com podem veure en la part esquerra de la figura 2.1, la descripció de la nostra experiència és molt semblant a la d'abans. No obstant això, té lloc un procés físic que no observem en el primer cas. Si canviem l'angle d'incidència del punter làser, veurem que hi ha un angle a partir del qual ja no

observem com el raig travessa de l'aigua a l'aire, sinó que presenta successives reflexions en ziga-zaga en l'interior del volum d'aigua fins que escapa del recipient (figura 2.2).

Fig.2.2.- Reflexions en ziga-zaga de la llum en l'interior de l'aigua quan el làser incideix primer en l'aigua.



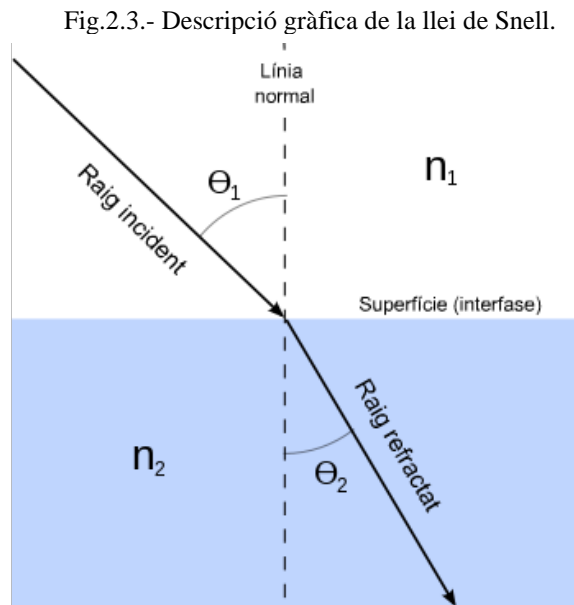
Fonament teòric: Els processos físics que tenen lloc en aquest experiment poden ser emmarcats en els conceptes següents. Per un costat en l'efecte Tyndall, a causa del qual veiem llum dispersa quan travessa un fluid amb partícules en suspensió, generalment de grandària microscòpica. Aquesta mena de dissolucions s'anomenen dissolucions col·loïdals. El pols en suspensió d'una habitació o els llums de posició d'un automòbil quan travessen un banc de boira són exemples d'aquest tipus de mescles que podem trobar diàriament. La importància que la dissolució siga de tipus col·loïdal radica en la possibilitat de veure tota la trajectòria del raig làser quan passa pel recipient i poder fer així una anàlisi descriptiva del nostre experiment amb total claredat.

Per altra banda, la trajectòria dels rajos de llum verifica la llei de Snell, una de les lleis fonamentals de l'òptica, la qual relaciona geomètricament la desviació en les trajectòries d'un feix de llum incident amb el transmissor quan aquest travessa dos medis que tenen propietats òptiques diferents. Els medis estan caracteritzats, des del punt de vista de l'òptica, per un paràmetre adimensional anomenat índex de refracció, $n = c/v$, que pot ser interpretat com la variació en la velocitat de la llum quan aquesta travessa un medi on es mou amb velocitat v

respecte del seu valor c en el buit. Aquests fenòmens són coneguts com a reflexió i refracció i són descrits mitjançant la fórmula següent [Tipler i Mosca 2012]:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2-1)$$

on n_1 i θ_1 són, respectivament, l'índex de refracció i l'angle d'incidència en el medi 1; anàlogament per al medi 2.



El raig reflectit i refractat tenen lloc en un mateix pla d'incidència. I, a més, la simetria de la llei de Snell implica que les trajectòries dels rajos de llum són reversibles, la qual cosa explica per què en la primera configuració de l'experiment els rajos emergents del recipient són paral·lels al raig incident.

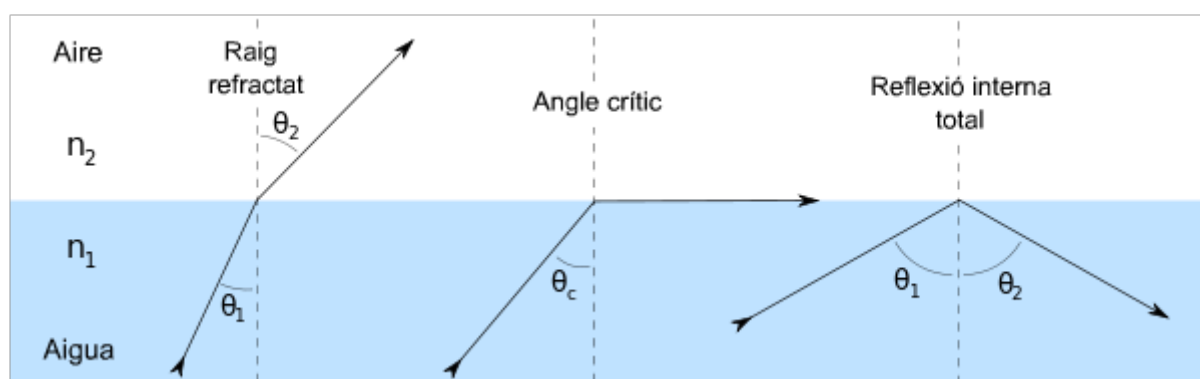
D'altra banda, en la primera de les configuracions del nostre experiment (esquerra de la figura 2.1), atès que l'índex de refracció del primer medi (aire, $n_1 = 1$) és menor que el del segon medi (aigua, $n_2 = 1.33$), observarem tant el fenomen de reflexió com el de refracció de la llum del làser. Tanmateix, si adequem el nostre dispositiu a la segona d'aquestes configuracions, tindrem que l'índex de refracció del nostre nou primer medi n_2 serà major que el del segon n_1 i observarem que a partir d'un determinat angle, donat per

$$\theta_2 = \arcsen \frac{n_1}{n_2} \quad (2-2)$$

deixarem de veure el fenomen de refracció i només veurem el de reflexió, tal com es pot observar gràficament en les figures 2.4 i 2.2 del nostre experiment. Aquest angle es coneix

com angle límit o angle crític i el fenomen com a reflexió interna total, cosa que és de vital importància en l'elaboració de fibres òptiques i d'instrumentació quirúrgica. Cal fer notar que el fenomen de reflexió interna total només té lloc quan el raig de llum passa d'un medi amb índex de refracció gran a un altre medi amb índex de refracció més petit.

Fig.2.4.- Descripció gràfica del concepte d'angle límit i de reflexió interna total.



Gràcies a la llei de Snell podem explicar fenòmens tan curiosos com l'aparent trencament d'un objecte rígid, com per exemple una vareta metàl·lica, quan la introduïm en l'aigua (figura 2.5) o aconseguir que un objecte es torne invisible quan l'introduïm en un determinat líquid (figura 2.6). El primer s'explica pel fet que els rajos de llum, quan travessen dos medis amb índexs de refracció diferents, canvien la velocitat i això fa que experimenten una desviació en la trajectòria. Per tant, veurem la part de la vareta introduïda en l'aigua com si no fóra la continuació natural de la part exterior. D'altra banda, si introduïm un material en un líquid amb un índex de refracció semblant al del material, la llum, quan passa d'un medi a altre, a penes és refractada, la qual cosa implicaria que l'objecte introduït mostraria una aparent invisibilitat òptica. A la figura 2.6 podem veure aquest fenomen quan introduïm una vareta de vidre pyrex dins d'un vas amb oli de bebè, ja que els índex de refracció d'aquests dos materials són molt semblants ($n \sim 1.52$) [Rheims *et al.* 1997]. També obtenim el mateix fenomen quan posen boletes de gel dins d'un got d'aigua. Un altre experiment seria introduir un capil·lar dins d'un vas amb oli de bebè, en aquest cas, desapareixerà el vidre del capil·lar però seguirem veient el centre del capil·lar, ja que està ple d'aire. Cal dir que, com que l'índex de refracció de cada material depèn de la longitud d'ona de la llum que hi incideix, seria possible fins i tot que, exposat a una longitud d'ona que no siga la de la llum natural (per

exemple, en una sala de revelatge fotogràfic amb un làser de He-Ne o una llum ultraviolada), el nostre dispositiu experimental perd la propietat d'invisibilitat òptica.

Fig. 2.5.- Aparent doblegament d'una vareta rígida quan és introduïda en aigua.

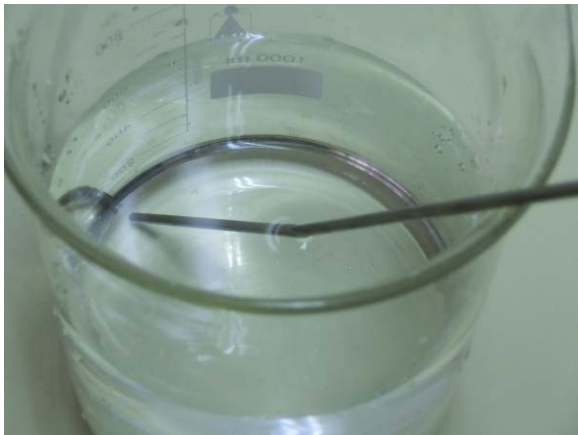


Fig. 2.6.- Invisibilitat òptica aconseguida a la llum natural quan introduïm una vareta de vidre pyrex en oli de bebè.



Conceptes que cal reforçar o consolidar:

Refracció de la llum, trajectòries dels rajos lluminosos, canvi de velocitat de la llum en diferents medis, caracterització òptica dels medis per l'índex de refracció. Reflexió interna total i importància de l'angle límit. Requeriment d'una dissolució de tipus col·loïdal per a observar l'efecte Tyndall amb el làser.

2.3. Tira d'alumini ondulant

Objectius: Introduir la força magnètica sobre corrents. Mostrar que un metall no ferromagnètic experimenta una força a causa d'un camp magnètic quan el recorre un corrent elèctric. Il·lustrar el producte vectorial de dos vectors i mostrar que la direcció de la força magnètica pot ser determinada per la regla de la mà dreta.

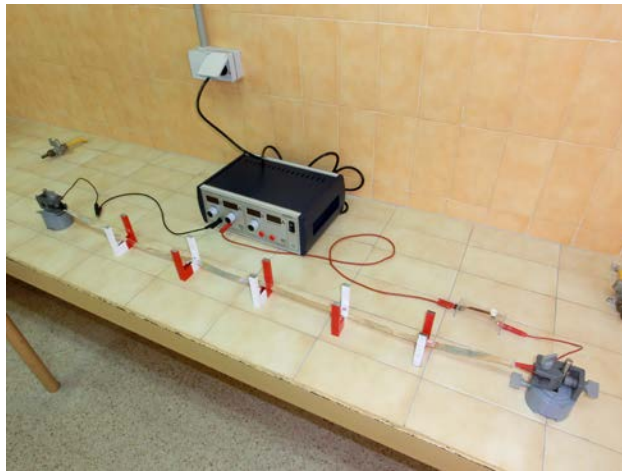
Paraules clau: Força magnètica sobre càrregues en moviment; camp magnètic; corrent elèctric; material ferromagnètic; material no ferromagnètic; regla de la mà dreta; producte vectorial.

Materials: Font d'alimentació de corrent continu (DC), 4 o 5 imants en forma d'U, cinta llarga i estreta de paper d'alumini, pinces de cocodril i bananes.

Descripció experimental: Col·loquem els imants en forma d'U en línia recta damunt d'un banc de laboratori, de manera que la seua part oberta estiga cap a dalt; cada imant ha de tenir els pols alternats respecte dels veïns. Aleshores, col·loquem la tira llarga de paper d'alumini

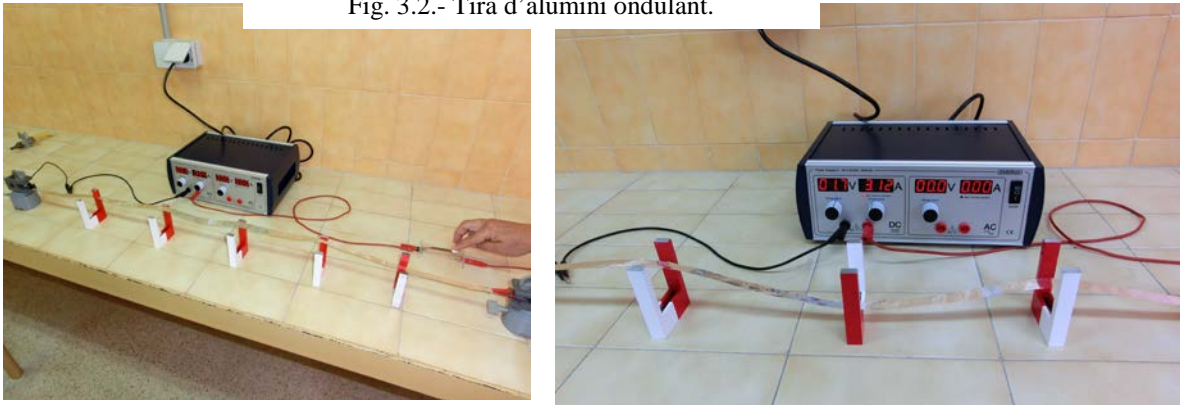
entre la part oberta dels imants. A continuació, connectem la tira d'alumini a la font d'alimentació DC subjectant-la amb pinces de cocodrill en els extrems, tal com apareix il·lustrat a la figura 3.1. És important assegurar-se que els extrems de la tira de paper d'alumini es troben ben subjectes a les pinces de cocodrill i no es mouran.

Fig. 3.1.- Muntatge experimental.



També cal assegurar-se que la font d'alimentació DC està apagada en aquest moment, ja que la polaritat de la font d'alimentació farà que la tira d'alumini pugui pujar entre uns imants i baixar entre altres quan la font d'alimentació es connecti. Amb la font d'alimentació DC apagada, agafem un imant i l'apropem a la làmina d'alumini per a mostrar als estudiants que la tira de paper no experimenta cap força ni d'atracció ni de repulsió amb l'imant, ja que es tracta d'un material no ferromagnètic. Indicarem als estudiants que un corrent elèctric pot convertir qualsevol metall conductor en un electroimant. Seguidament tornem a posar l'imant al seu lloc del banc de laboratori. Ara connectem la font d'alimentació. Si la polaritat de tots els imants està orientada de la mateixa forma i si el corrent elèctric circula en el sentit adequat, la tira de la làmina d'alumini haurà d'alçar-se entre les parts obertes dels imants de ferradura, tal com mostra a la part esquerra de la figura 3.2; si no es així, cal canviar les connexions elèctriques per tal d'invertir el sentit del corrent elèctric. Aquesta pot ser una bona ocasió per a introduir i explicar la famosa regla de la mà dreta als estudiants.

Fig. 3.2.- Tira d'alumini ondulant.



Com a il·lustració final de l'efecte que la força magnètica fa sobre un corrent elèctric que passa a través de la làmina d'alumini, es poden invertir els pols dels imants (rotar-los 180 graus respecte de la vertical i de la seua posició original en el banc del laboratori), tal com es pot observar a la part dreta de la figura 3.2. Si espaiem els imants al llarg del banc i col·loquem els imants amb polaritat invertida respecte al següent imant, obtindrem que, quan la font d'alimentació es connecta, la tira d'alumini tindrà la forma d'una ona, ja que en alguns punts pujarà i en altres baixarà, tal com queda reflectit a la part dreta de la figura 3.2.

Fonament teòric: Un camp magnètic exerceix una força sobre una càrrega en moviment. Ja que un corrent elèctric és justament un “flux” continu de càrregues en moviment, un camp magnètic hi exercirà una força. La direcció d'aquesta força ve determinada per la direcció del camp magnètic i del flux del corrent. Encara que el corrent elèctric és degut al moviment d'electrons, per conveni el transport de càrregues en un corrent és considerat positiu. La direcció i sentit en què actua la força sobre el corrent elèctric es determina molt fàcilment per la famosa regla de la mà dreta, tal com es presenta a la figura 3.3¹.

Fig. 3.3.- Regla de la mà dreta.

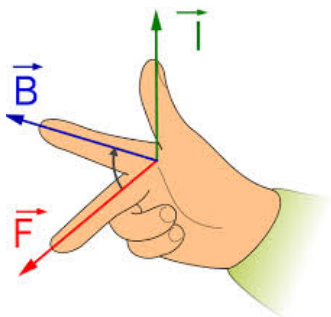
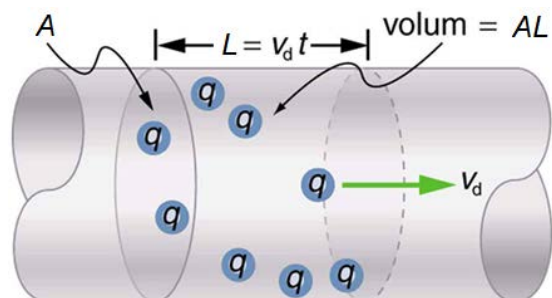


Fig. 3.4.- Transport de càrregues que es mouen a una velocitat v_d al llarg d'un segment de cable de longitud L i secció transversal A .



¹ Font de la imatge: Wikimedia Commons, Jfmelero

Inicialment, cal col·locar els dits polze, índex i cor de la mà dreta en les direccions que indica la figura 3.3. Cal tenir en compte que els dits han de formar aproximadament angles rectes entre ells. Aleshores, si assenyalem amb el dit polze al llarg del sentit en el qual flueix el corrent elèctric \vec{I} , i el dit índex en el sentit del camp magnètic \vec{B} , el dit cor automàticament indicarà la línia d'acció de la força \vec{F} que experimenta el corrent elèctric a causa d'un camp magnètic. Matemàticament, la força magnètica pot ser expressada en notació vectorial com segueix [Tipler i Mosca 2012]:

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (3-1)$$

on \vec{F} és la força exercida pel camp magnètic \vec{B} sobre una càrrega q que es mou amb velocitat \vec{v} en la regió on actua aquest camp magnètic. Ja que un corrent elèctric és justament un flux continu de càrregues fluint al llarg d'un cable o un altre conductor a una velocitat de moviment v_d determinada pel material del conductor, tal com mostra la figura 3.4², el terme de la càrrega per la velocitat a l'equació (3-1) pot ser identificat com el corrent elèctric I , o la càrrega per unitat de temps, que flueix per un cable de longitud L (figura 3.4), i la força magnètica es pot escriure com:

$$\vec{F} = \vec{I}L \times \vec{B} \quad (3-2)$$

L'equació (3-2) deriva directament de l'equació (3-1), ja que el corrent I és justament el nombre n de càrregues q per unitat de volum que creuen un volum AL en un temps t amb una velocitat de moviment v_d [Tipler i Mosca 2012], és a dir, $I = nqv_dA$.

Les equacions (3-1) i (3-2) simplement expressen amb símbols la regla de la mà dreta il·lustrada anteriorment en la figura 3.3.

Conceptes que cal reforçar o consolidar: Força magnètica sobre un corrent elèctric. La llei de la força magnètica i el seu significat qualitatiu mitjançant la regla de la mà dreta. La importància de la direcció en les equacions vectorials (producte vectorial).

3. CONCLUSIONS

La utilització d'experiments senzills o sorprenents ens permet l'arrelament de conceptes de física mitjançant raonament i discussions al voltant d'aquestes experiències. D'aquesta

² Font de la imatge: <http://cnx.org/content/m42341/latest/?collection=col11406/latest>

manera els estudiants s'impliquem més en el procés d'aprenentatge, els resulta molt més estimulants i, com a conseqüència, els progressos són més significatius i perduren en el temps. També s'aconsegueix que els mateixos alumnes valoren els seus coneixements de la matèria i descarten preconceptes erronis que de vegades es troben molt arrelats i associats al mal anomenat sentí comú.

Hem presentat experiments de fluids realitzats amb un flascó de Mariotte (per a discutir conceptes de pressió, cabal i moviment de fluids), un experiment sobre la refracció de la llum (on introduïm conceptes com l'índex de refracció, variació de la trajectòria dels rajos lluminosos quan passen d'un medi a un altre o el fenomen de reflexió interna total). L'experiment de la tira de paper d'alumini ondulant ens permet incidir en la noció de la força magnètica creada per un camp magnètic en un material pel qual flueix un corrent elèctric, determinant-ne el sentit i direcció mitjançant la regla de la mà dreta. D'aquesta manera cada experiment permetrà als alumnes arrelar conceptes de diferents àrees de la física com fluids, òptica i magnetisme.

4. DIFICULTATS TROBADES, PROPOSTES DE MILLORA I PREVISIÓ DE CONTINUÏTAT

Els reptes d'aquest projecte han sigut la identificació d'errors en diferents conceptes de física per part de l'alumnat que arriba a la universitat i, per altra banda, l'elecció, el disseny i l'elaboració d'experiments senzills i/o suggerents que donaren lloc a la discussió i revisió de diversos conceptes de física. Hi ha encara molt treball a fer en aquesta àrea de l'elaboració d'experiments de física recreativa, on la senzillesa del disseny i la sorpresa del resultat són fonamentals.

5. REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

- Caamaño A. (1992) Los trabajos prácticos en ciencias experimentales. Una reflexión sobre sus objetivos y una propuesta para su diversificación. *Aula de Innovación Educativa* 9, 61-68 Barcelona.
- Feynman R. P. (1998) *Seis piezas fáciles. La física explicada por un genio*, Grijalbo Mondadori, Barcelona.
- García Molina R. (coord.) (2011) Monográfico sobre ciencia recreativa. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 8 (número extraordinari).

- Hoffmann R. & S. Y. McGuire (2009) Teaching and learning strategies that work. *Science* 325, 1203-1204.
- Kires M. (2006) Mariotte bottle with side openings. *The Physics Teacher* 44, 388-389.
- Michel Sandoval B. & M. García Guerrero (coord.) (2014) *La ciencia en nuestras manos. Una perspectiva de los talleres de divulgación sin el color de rosa*. Zacatecas, Mèxic.
- Maroto J. A., J. de Dios & F. J. de las Nieves (2002) Use of a Mariotte bottle for the experimental study of the transition from laminar to turbulent flow. *Am. J. Phys.* 70, 698-701.
- Rheims J., J. Köser i T. Wriedt (1997) Refractive-index measurements in the near-IR using an Abbe refractometer, *Measurement Science and Technology*, 8, 601-605.
- Tipler P. A. & G. Mosca (2012) *Física para la ciencia y la tecnología*, 6a ed., Reverté, Barcelona.