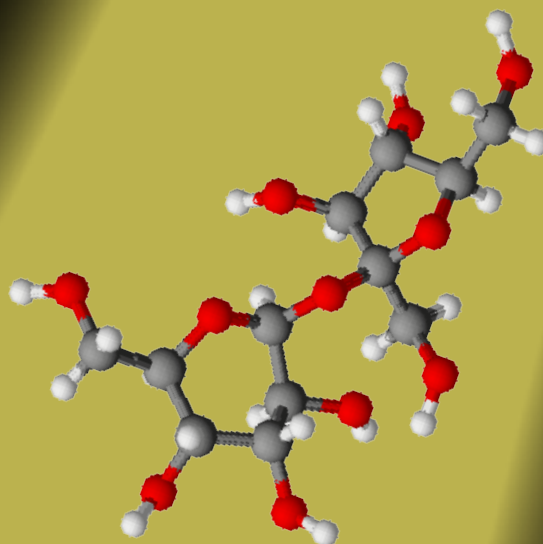
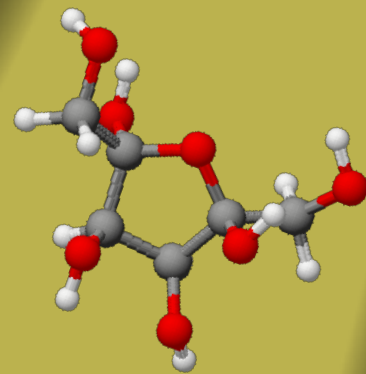


# LA CARA DOLÇA DE LA LLUM

DETERMINACIÓ EXPERIMENTAL DE LA  
CONCENTRACIÓ DE SUCRE EN BEGUDES  
REFRESCANTS MITJANÇANT POLARIMETRIA  
I REFRACTOMETRIA *LOW COST*



Julia Domínguez Martíñez  
Treball de Recerca de Batxillerat  
Tutoritzat per Anicet Cosials  
Curs 2016-2017  
Institut Guindàvols, Lleida

# LA CARA DOLÇA DE LA LLUM

---

DETERMINACIÓ EXPERIMENTAL DE LA CONCENTRACIÓ DE SUCRE  
EN BEGUDES REFRESCANTS MITJANÇANT POLARIMETRIA I  
REFRACTOMETRIA *LOW COST*

---

## **Abstract**

This research essay aims to set out, develop and assess hand-made methods based on the polarization and refraction of light that allow to experimentally determinate the concentration of sugar in soft drinks. Therefore, in this essay you will firstly find a synthetic theoretical framework about light and its wave phenomena, and, afterwards, a practical part that is divided into two blocks: polarimetry and refractometry. In both of them it is initially explained how to measure the sugar content of some drinks by means of a laboratory polarimeter and refractometer, and, subsequently, it is shown how to economically reproduce these devices and how to carry on that same experiment with them. At the end, it is expounded a qualitative global valuation of the obtained results, as well as a personal conclusion.

**Julia Domínguez Martínez**

Treball de Recerca de Batxillerat (TRB)

Tutoritzat per Anicet Cosialls

Curs 2016-2017

Institut Guindàvols, Lleida

## Agraïments

Diuen que el temps val or. Això no obstant, el professorat que m'ha ajudat a fer possible aquest treball de recerca, me n'han dedicat sense esperar res a canvi.

En primer lloc, he de donar les gràcies, per suposat, a l'Anicet Cosialls. Recordo el dia que va treure d'un calaix l'article d'una revista científica dels anys 80 que va ser el punt de partida d'aquest projecte. Jo, assentint amb el cap i fent veure que entenia alguna cosa, vaig acceptar el repte. Així, ell ha estat la persona que, amb molt d'entusiasme i paciència, ha guiat aquest treball i ha resolt tots els meus dubtes.

També vull dedicar unes paraules als mestres Josep Maria Perelló, que amb el seu do de manetes em va ajudar a construir l'estructura del meu polarímetre; Rosa Pujol, que sense ni tan sols conèixer-me, em va convidar dues tardes senceres al laboratori d'un altre institut i em va ensenyar a treballar amb un polarímetre i un refractòmetre; i Santiago Rodao, que va elaborar els plànols d'un dels meus aparells casolans a la perfecció.

Jo, tota sola, mai ho hagués aconseguit. Mil gràcies a tots.

Lleida, gener 2017.

# Índex

<b>1. DESCOBRINT LA LLUM</b>	<b>5</b>
<b>1.1. Introducció</b>	<b>6</b>
<b>1.2. Objectius</b>	<b>8</b>
<b>1.3. Marc teòric</b>	<b>9</b>
1.3.1. L'eterna dualitat, ones o partícules	9
1.3.2. Propagació de la llum	12
1.3.2.1. Interferències i difracció	12
1.3.2.2. Reflexió i refracció	13
1.3.2.3. Polarització	15
<b>2. DISSENY EXPERIMENTAL</b>	<b>17</b>
<b>2.1. Polarimetria</b>	<b>18</b>
2.1.1. Raonaments teòrics	19
2.1.1.1. Substàncies òpticament actives	19
2.1.1.2. Descripció de l'equipament de laboratori	19
2.1.2. Experiment 1. Determinació experimental de la rotació específica de substàncies òpticament actives mitjançant un polarímetre de laboratori	23
2.1.2.1. Objectius de l'experiment	23
2.1.2.2. Disseny de l'experiment	23
2.1.2.3. Resultats obtinguts	26
2.1.2.4. Conclusions de l'experiment	28
2.1.3. Experiment 2. Determinació experimental de la concentració de sacarosa en begudes refrescants mitjançant un polarímetre de laboratori	29
2.1.3.1. Objectius de l'experiment	29
2.1.3.2. Disseny de l'experiment	29
2.1.3.3. Resultats obtinguts	33
2.1.3.4. Conclusions de l'experiment	35
2.1.4. Construcció d'un polarímetre casolà	36
2.1.4.1. Objectius de l'experiment	36
2.1.4.2. Disseny de l'experiment	36
2.1.5. Experiment 3. Determinació experimental de la longitud d'ona de la llum groga del nostre polarímetre casolà	44
2.1.5.1. Objectius de l'experiment	44
2.1.5.2. Disseny de l'experiment	44
2.1.5.3. Resultats obtinguts	50
2.1.5.4. Conclusions de l'experiment	51
2.1.6. Experiment 4. Determinació experimental de la rotació específica de substàncies òpticament actives mitjançant el nostre polarímetre casolà	52
2.1.6.1. Objectius de l'experiment	52

2.1.6.2. Disseny de l'experiment	52
2.1.6.3. Resultats obtinguts	52
2.1.6.4. Conclusions de l'experiment	54
2.1.7. Experiment 5. Determinació experimental de la concentració de sacarosa en begudes refrescants mitjançant el nostre polarímetre casolà	55
2.1.7.1. Objectius de l'experiment	55
2.1.7.2. Disseny de l'experiment	55
2.1.7.3. Resultats obtinguts	56
2.1.7.4. Conclusions de l'experiment	59
2.1.8. Valoracions finals	60
<b>2.2. Refractometria</b>	<b>61</b>
2.2.1. Raonaments teòrics	62
2.2.1.1. Descripció de l'equipament de laboratori	62
2.2.2. Experiment 1. Determinació experimental de la concentració total de sucres en begudes refrescants mitjançant un refractòmetre de laboratori	65
2.2.2.1. Objectius de la pràctica	65
2.2.2.2. Disseny de l'experiment	65
2.2.2.3. Resultats obtinguts	67
2.2.2.4. Conclusions de l'experiment	68
2.2.3. Experiment 2. Determinació de la concentració de sucres total en begudes refrescants mitjançant un refractòmetre casolà	69
2.2.3.1. Objectius de l'experiment	69
2.2.3.2. Disseny de l'experiment	69
2.2.3.3. Resultats obtinguts	74
2.2.3.4. Conclusions de l'experiment	77
2.2.4. Valoracions finals	78
<b>3. CONCLUSIONS</b>	<b>79</b>
<b>3.1. Conclusions</b>	<b>80</b>
<b>4. REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES</b>	<b>82</b>
<b>5. GALERIA D'IMATGES</b>	<b>83</b>

# 1. Descobrint la llum

- 1.1 Introducció
- 1.2 Objectius
- 1.3 Marc teòric

# 1.1. Introducció

En només unes dècades, les xifres de la població obesa a tot el planeta han arribat a superar les referents a la desnutrició. De fet, rarament passem més d'una setmana sense sentir-ne a parlar, i sovint ens culpem de menjar excessivament i de no exercitar-nos el suficient. No obstant això, molts científics refuten aquest estereotip i senyalen un altre factor com a principal responsable del conflicte. Causant de la diabetis de tipus 2, la hipertensió arterial, el fetge gras o, fins i tot, el càncer de pàncrees, el sucre és també un dels grans culpables de la crisi de l'obesitat mundial.

Als anys setanta, quan l'obesitat i les malalties cardíques estaven en augment, se'ns va dir que els greixos n'eren els culpables, i així es va estendre la idea que tot allò que no conté lípids no engreixa i, per tant, és sa. D'aquesta forma, es van començar a comercialitzar productes molt baixos en greixos saturats, però molt més rics en sucres que mai, fins al punt que avui dia pràcticament tots els aliments processats contenen sucres. Això va suposar un gran creixement per a la indústria del sucre, en detriment de la salut de la població.

Un clar exemple és el cas de les begudes ensucrades, tan habituals en el dia a dia de la nostra dieta, i aparentment inofensives. Darrere la dolça felicitat que prometen les campanyes publicitàries d'aquests productes, s'amaga l'amarga realitat de les calories buides, una font explosiva d'energia sense cap tipus d'aportació nutricional per al nostre cos.



**Figura 1. El sucre, un dels grans culpables de la crisi de l'obesitat mundial.**

## **Declaració de l'Organització Mundial de la Salut, octubre 2016:**

*"La ingesta de sucres lliures, entre ells els continguts en productes com les begudes ensucrades, és un dels principals factors que estan donant lloc a un augment de la obesitat i la diabetis al món. Si els governs graven fiscalment productes com les begudes ensucrades, es podria evitar el patiment de moltes persones i salvar vides. També es reduiria la despesa sanitària i augmentarien els ingressos fiscals, que es podrien invertir en els serveis públics de salut."*

Així doncs, arran d'aquesta preocupació i, sobretot, de l'afany per posar en pràctica la química i la física a l'aula i demostrar-ne la seva simplicitat, el meu tutor, l'Anicet Cosials, em va proposar aquest projecte. Vam decidir establir com a objecte del treball de recerca determinar, mitjançant pràctiques experimentals de polarimetria i refractometria, la concentració de sucres de tota una mostra de begudes de marques multinacionals i marques blanques que es poden trobar a les grans superfícies comercials. En primer lloc, amb els aparells professionals d'un laboratori, i després, assumint el repte de realitzar-les amb les eines rudimentàries a l'abast de qualsevol estudiant i amb uns coneixements de física i química -que no van mes enllà dels que es poden adquirir al Batxillerat- que ens permetessin fabricar un polarímetre i un refractòmetre de forma casolana.

Pel que fa a la memòria de la recerca, l'he estructurat en un preàmbul introductori, el disseny experimental de les pràctiques de polarimetria i refractometria, i unes conclusions finals.

Es procedeix aquí doncs a fer l'exposició d'aquest preàmbul introductori, complementat amb els objectius del treball i un sintètic marc teòric sobre la llum i les seves propietats.

Quant al disseny experimental, que és la part fonamental d'aquest treball de recerca, hi presentarem dos blocs que tracten temàtiques diferents, però que van ser modelats amb el mateix objectiu.

El primer bloc està enfocat a la **polarimetria**. En ell s'expliquen els fonaments teòrics necessaris per comprendre el principi de funcionament d'un polarímetre i així poder fer-ne anar un, esbrinar la rotació específica de sucres lliures presents en les begudes ensucrades i determinar-ne la concentració de sacarosa. S'hi exposen llavors els protocols per construir amb materials de proximitat el polarímetre *low cost* que vam dissenyar per desenvolupar els mateixos experiments.

El segon bloc, està dedicat a la **refractometria**, més breu quant a l'exposició perquè molts dels procediments utilitzats ja estaven explicats al bloc de la polarimetria, però igualment dens en treball i resultats. En ell s'inclouen uns coneixements previs sobre el refractòmetre i els passos a seguir per mesurar el contingut total de sucres en diferents begudes. Tot seguit, tal i com vam fer en l'apartat anterior, es presenta com reproduir un muntatge experimental basat en el principi de la refracció de la llum que ens permet fer aquesta mateixa pràctica.

A més a més, tots dos capítols del disseny experimental conclouen amb una valoració qualitativa dels aparells que vam construir de forma casolana, com a plataforma prèvia per a les conclusions finals.

A nivell personal, allò que en principi no era més que una pràctica experimental plena de limitacions, es va anar transformant, alhora que en una llum d'alerta sobre els riscos que comporta la ingesta de begudes ensucrades, en un recurs pedagògic summament atractiu i motivador. Ara, en rellegir el treball, lluny de només haver complert amb l'objectiu de parametritzar i comprovar uns valors i resultats, em sento com si hagués format part d'una fantàstica aventura òptica, d'observació dels centelleigs i trajectòries de la llum sortejant les molècules quirals de fructosa, glucosa i sacarosa. **Amb un pressupost de 50 euros per construir els meus equips *low cost* i comprar begudes ensucrades, he descobert ni més ni menys que la química de la llum, un objecte de recerca immens i molt més apassionant que el de desvetllar el costat fosc dels xarops que es promocionen amb cares dolces i falsos somriures.** Aquí comença per a mi l'aventura d'endinsar-me i seguir investigant en l'enlluernador món de la Ciència.



## 1.2. Objectius

Aquest treball de recerca té com a finalitat plantejar, elaborar i avaluar diversos mètodes per determinar experimentalment la concentració de sucres en begudes refrescants, tot basant-nos en els principis dels fenòmens ondulatoris de la llum, assumint el repte de fabricar de forma casolana l'instrumental de laboratori utilitzat a les pràctiques docents.

La idea principal és treballar tant l'àmbit de la polarimetria com el de la refractometria, així que podem separar els objectius en els dos blocs diferenciats.

En relació a la polarimetria, ens hem proposat:

- Determinar la concentració de sacarosa en begudes refrescants i la rotació específica de substàncies òpticament actives mitjançant un polarímetre de laboratori.
- Dissenyar i construir un polarímetre casolà amb els mitjans de què disposem al laboratori de l'institut.
- Determinar la concentració de sacarosa en begudes refrescants i la rotació específica de substàncies òpticament actives mitjançant el nostre polarímetre casolà.

Pel que fa a l'àmbit de la refractometria, ens vam plantejar objectius similars:

- Determinar la concentració total de sucres en begudes refrescants mitjançant un refractòmetre de laboratori.
- Dissenyar i construir un refractòmetre casolà amb els mitjans de què disposem al laboratori de l'institut.
- Determinar la concentració total de sucres en begudes refrescants mitjançant el nostre refractòmetre casolà.

Per tal de complir aquestes qüestions, cada bloc està dividit en diverses pràctiques que, al seu torn, inclouen una sèrie d'objectius secundaris que ens ajudaran a conduir els experiments.

## 1.3. Marc teòric

Com a contingut introductor i inexcusable, dediquem a continuació un apartat al marc teòric d'aquest treball de recerca. Per a això, farem un recorregut cronològic per les grans "teories" de la llum, a fi i efecte d'anar revelant els seus misteris i descobrir a poc a poc, com van anar fent els grans savis de la Història, les seves característiques, el seu caràcter ondulatori, els principis de reflexió i refracció, la polarització i la difracció,... Assimilar en definitiva el que són uns fonaments teòrics imprescindibles per a la pràctica experimental posterior. Newton, Einstein, Pasteur, Maxwell, Planck, Hoff,... des de les velles icones històriques de la Ciència fins als últims premis Nobel, les ments més preclares de la Humanitat s'han sentit atretes per l'embruixament de la llum i han escodriyat en els seus misteris.

### 1.3.1. L'eterna dualitat, ones o partícules

És convenient comentar en primer lloc els dos models que han existit sobre la llum: el corpuscular i l'ondulatori. Històricament aquestes dues teories han estat antagòniques, ja que abans que no se'n demostrés el caràcter ondulatori, hi havia científics que defensaven un model corpuscular i d'altres un model ondulatori. La paradoxa ha estat que tots dos models són perfectament vàlids i complementaris l'un de l'altre.

El físic anglès Isaac **Newton** (1643-1727) va proposar una **teoria corpuscular** per a la llum a final del segle XVII. Les hipòtesis en què es basava aquest model eren les següents:

- La llum està composta per corpuscles, és a dir, partícules tan diminutes que no poden ser fraccionades, que són emeses en totes direccions i a gran velocitat pel focus lluminós.
- Aquestes partícules, animades per un moviment rectilini, produeixen la sensació de la visió quan arriben a l'ull.
- Per explicar els colors, Newton postulava que cada color està format per corpuscles de naturalesa diferent.

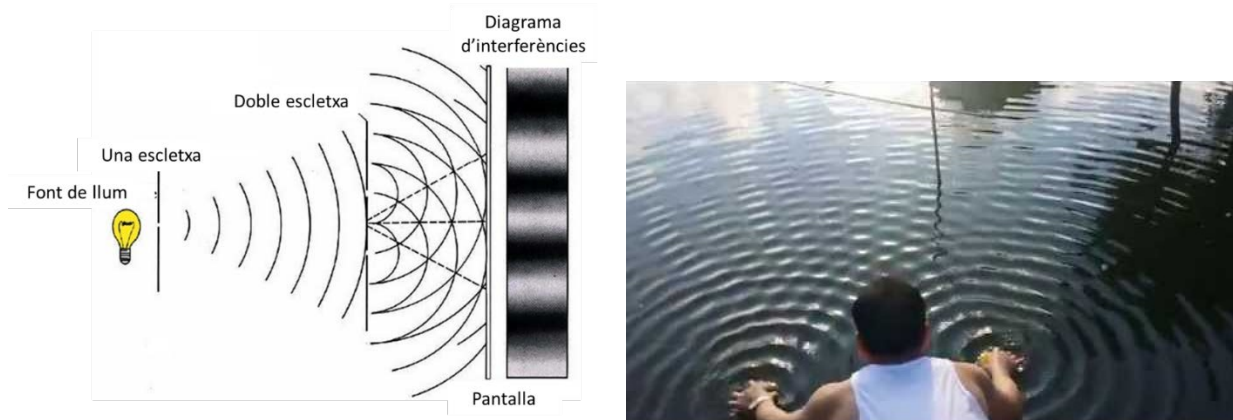
Els arguments a favor d'aquest model eren:

- Formació d'ombres. Es podria explicar la nitidesa de les ombres admetent que quan la llum arriba a un cos opac alguns dels corpuscles que la formen reboten, i d'altres continuen amb el seu moviment rectilini tot dibuixant la forma de l'objecte.
- El camp gravitatori sembla no afectar la trajectòria rectilínia de la llum. La velocitat de la llum és tan gran que la trajectòria dels corpuscles que la formen no es veu afectada pels camps gravitatoris.
- Llei de la reflexió. S'interpreta fàcilment com una conseqüència del xoc elàstic que té lloc entre els corpuscles constituents de la llum i la superfície reflectora. S'explica a partir dels principis de conservació de la quantitat de moviment i de l'energia aplicats al xoc elàstic.

El físic holandès Christian **Huygens** (1629-1695) va elaborar un **teoria ondulatoria** respecte a la naturalesa de la llum, suposant que tot l'espai estava ocupat per un medi, que va anomenar *èter*, a través del qual es propagava la llum. Els arguments que van reforçar aquesta teoria són:

- Lleis de la reflexió i de la refracció. No té explicació el fet que alguns corpuscles rebotin elàsticament a la superfície de separació dels dos medis (reflexió), mentre que d'altres la traspassin i continuïn el seu moviment (refracció). Quan Newton va demostrar la llei de la refracció fent servir la hipòtesi del model corpuscular, va deduir que el raig refractat s'allunya de la normal (línia perpendicular al pla de la superfície en el punt d'incidència) quan el raig passa d'un medi menys dens a un altre de més dens. Això és justament el contrari del que s'observa a la realitat.
- Colors que formen la llum blanca. Es poden interpretar considerant que cada color correspon a una longitud d'ona diferent, i així el fet que la llum se separi en diferents colors s'explica fàcilment pels fenòmens de la difracció i refracció de la llum.
- Dos raigs de llum es creuen sense pertorbar-se una vegada han interferit.

La naturalesa ondulatoria de la llum va ser demostrada per primer cop en 1801 pel científic anglès Thomas **Young** (1773-1829). Per analogia amb les ones sobre l'aigua, va descobrir el fenomen de les interferències lluminoses, pel qual quan dues ones procedents d'una mateixa font se superposen en una pantalla, apareixen sobre ella zones de màxima llum i zones de foscor, com un diagrama d'interferències.

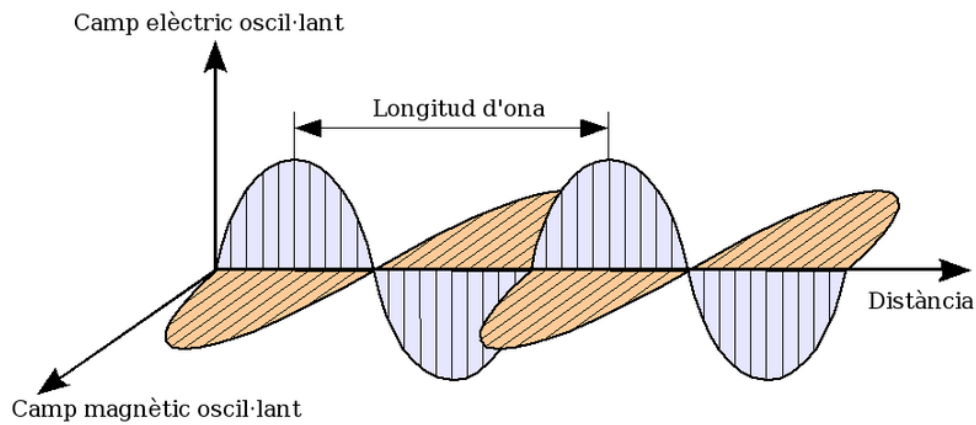


**Figura 2. Analogia entre la llum i l'aigua segons l'experiment de Young.**

La teoria ondulatoria de la llum va culminar el 1860 amb les prediccions del físic escocès James Clerk **Maxwell** (1831-1879) sobre les ones electromagnètiques. Una ona electromagnètica és una pertorbació periòdica del camp elèctric i del camp magnètic que es propaga en l'espai a la velocitat constant de la llum. Es tracta d'ones transversals en què el camp elèctric i el magnètic són perpendiculars entre sí i, alhora, perpendiculars a la direcció de propagació.

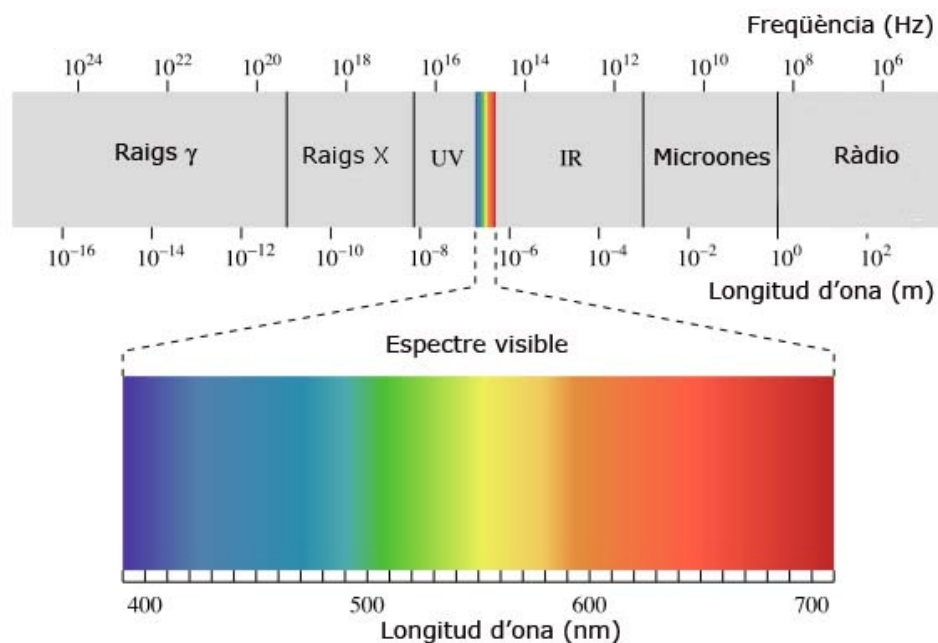
Es produeixen ones electromagnètiques quan una partícula carregada es troba sotmesa a una acceleració o bé quan existeixen corrents variables. La càrrega elèctrica en moviment dóna lloc a un

camp elèctric variable que crea un camp magnètic variable. De la mateixa forma, aquest camp magnètic crea un camp elèctric variable i així es generen i es propaguen ones electromagnètiques contínuament.



**Figura 3.** Una ona electromagnètica consisteix en l'oscil·lació d'un camp elèctric i un camp magnètic perpendiculars entre si i perpendiculars a la direcció de propagació de l'oscil·lació.

Existeixen una gran quantitat d'ones electromagnètiques diferents segons la seva freqüència i longitud d'ona. La llum visible és només una part petita d'aquestes ones. Tradicionalment dividim l'espectre electromagnètic en set zones, tot i que els límits no són nítids, tal i com es veu a la grafia següent.



**Figura 4.** L'espectre electromagnètic es divideix en 7 zones, tot i que els límits entre zones no són nítids.

El físic alemany Max **Planck** (1858-1947, premi Nobel de Física 1918), en observar els fenòmens d'emissió i absorció de radiació electromagnètica per part de la matèria, va admetre que els intercanvis

d'energia que es produeixen entre matèria i radiació no es produeixen de forma contínua, sinó discreta, com a salts o paquets d'energia, que va denominar *quàntums*.

La naturalesa corpuscular de la llum va ser definitivament proposada en 1905 pel científic universal Albert **Einstein** (1879-1955, premi Nobel de Física 1921) en explicar l'efecte fotoelèctric, fenomen que consisteix en que alguns metalls, com el cesi, emeten electrons quan són il·luminats per un feix de llum i que no tenia sentit si es basava en el model ondulatori. Així, prenent la idea de discontinuïtat plantejada per Planck, va afirmar que no només l'emissió i l'absorció de la radiació es verifiquen de forma discontinua, sinó que la mateixa radiació és discontinua.

D'aquesta forma, Einstein va deduir l'existència del corpuscle lluminós, o fotó, que posseeix una energia  $E$  relacionada amb la freqüència  $f$  i la longitud d'ona  $\lambda$  de l'ona lluminosa per l'equació d'Einstein.

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

on  $c$  és la velocitat de la llum al buit i  $h$ , la constant de Planck.

## 1.3.2. Propagació de la llum

Una de les característiques fonamentals de la llum és la de la seva propagació. La creença popular és que la llum es propaga en línia recta. No obstant això, no sempre és així. Davant determinats obstacles, la llum pot prendre trajectòries diferents. És el cas de fenòmens com la difracció, la reflexió, la refracció i la polarització.

La propagació de la llum va ser inicialment descrita, mitjançant principis científics, per l'holandès Christian **Huygens** (1629-1695) i el francès Pierre de **Fermat** (1601-1665):

- El principi de Huygens estableix que qualsevol punt al qual arriba la pertorbació transmesa per una ona es comporta com a nou focus emissor d'ones secundàries, les quals es propaguen en totes direccions amb la mateixa velocitat de fase.
- El principi de Fermat estableix que la trajectòria seguida per la llum per passar d'un punt a un altre és aquella per la qual el temps de recorregut és mínim. En altres paraules, la llum tendeix a recórrer el camí òptic pel qual tarda el mínim de temps.

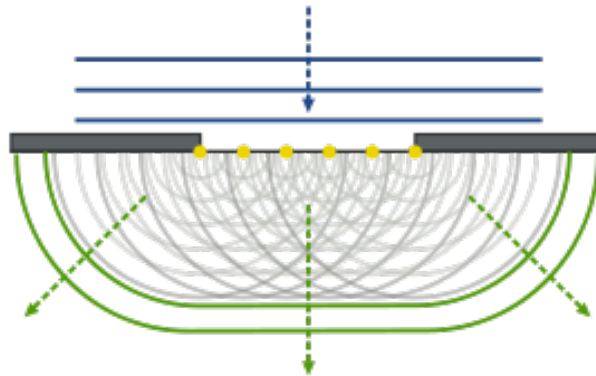
### 1.3.2.1. Interferències i difracció

El fenomen de les interferències es produeix quan dues ones d'igual longitud d'ona i amplitud coincideixen en una mateixa regió de l'espai en el mateix temps, la qual cosa genera una ona resultant que és significativament diferent de les inicials.

El principi de superposició d'ones ens permet explicar aquest fenomen. Segons aquest, la funció  $y$  de l'ona resultant de la interferència de les dues ones que conflueixen és la suma algebraica de les seves funcions d'ona  $y = y_1 + y_2$ .

Quan les perturbacions produïdes pels dos focus estan en fase (les crestes de les ones coincideixen) es produeix el que s'anomena una interferència constructiva i la intensitat de l'ona resultant serà màxima o igual a dues vegades l'amplitud de les ones que la conformen. Si estan desfasades, hi haurà un punt on el desfasament sigui màxim i es formarà una interferència destructiva, anul·lant-se l'ona.

Aquest fet explicaria el fenomen de la difracció: la distorsió o variació en la direcció de propagació d'una ona quan aquesta troba en la seva transmissió un obstacle que té unes dimensions comparables a la longitud d'ona i que n'impedeix la propagació.



**Figura 5. Feix de llum passant per una obertura – principi de Huygens.**

### 1.3.2.2. Reflexió i refracció

Aquests fenòmens es produeixen quan una ona es propaga per un determinat medi a una velocitat de fase  $v_1$ , que anomenem ona incident, arriba a la superfície que separa aquest primer medi d'un segon medi, diferent del primer i en el qual l'ona també es pot propagar amb una velocitat  $v_2$  diferent.

En la reflexió, una part de l'ona incident continua movent-se en el mateix medi, però varia la seva direcció de propagació i forma l'ona reflectida. Aquesta es propaga amb la mateixa velocitat de fase  $v_1$  que l'ona incident, en no haver variat en el medi de propagació, però ara ho fa en una direcció que forma un angle  $\alpha_r$  (angle de reflexió) respecte de la recta normal  $N$ .

Així doncs, sempre es compleix que:

- El raig incident, el raig reflectit i la normal es troben en el mateix pla.
- L'angle d'incidència és igual a l'angle de reflexió.

En la refracció, una part de l'ona incident penetra en el segon medi tot variant la seva direcció de propagació i forma l'ona refractada. Aquesta es transmet ara amb la velocitat de fase  $v_2$  del segon medi en una direcció que forma un angle  $\alpha_r'$  (angle de refracció) respecte de la recta normal  $N$ .

Si dividim la velocitat de la llum en el buit entre la que té en un medi transparent obtenim el valor que anomenem índex de refracció en aquell medi. Així, si l'índex de refracció de l'aigua és  $n = 1,333$ , vol dir que la llum es 1,333 vegades més ràpida en el buit que a l'aigua.

$$n = \frac{c}{v}$$

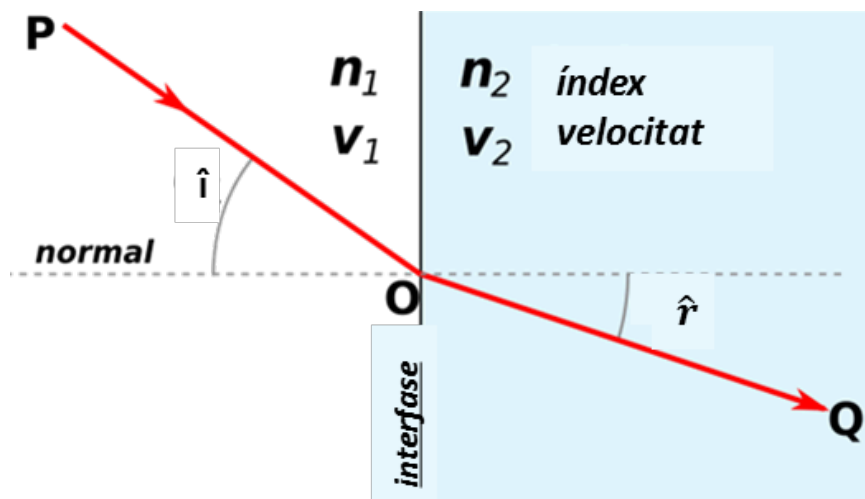
on  $n$  és l'índex de refracció,  $c$  és la velocitat de la llum en el buit i  $v$  és la velocitat de la llum en el medi natural.

Aquesta desviació va ser explicada per l'astrònom i matemàtic holandès Willebrord **Snell** van Royen (1580-1626). La llei de Snell és conseqüència del principi de Fermat, que indica que la llum es propaga entre dos punts seguint la trajectòria de recorregut òptic menor:

$$n_1 \times \sin \hat{i} = n_2 \times \sin \hat{r}$$

on  $n_1$  i  $n_2$  són els índex de refracció en els respectius medis,  $\hat{i}$  és l'angle d'incidència del raig i  $\hat{r}$  és l'angle de refracció.

La velocitat de la llum depèn del medi pel qual viatja. És més lenta quan el material és més dens, i viceversa. Per això, quan la llum passa d'un medi menys dens a un més dens, el raig de llum refractat s'apropa a la normal i, per tant, l'angle de refracció serà més petit que l'angle d'incidència. De la mateixa forma, si el raig de llum passa d'un medi més dens a un de menys dens, serà refractat allunyant-se de la normal i, per tant, l'angle d'incidència serà menor que el de refracció.



*Refracció de la llum entre dos medis de diferents índexs de refracció ( $n_2 > n_1$ ). Com que  $v_1 < v_2$ , l'angle de refracció  $\hat{r}$  és més petit que l'angle d'incidència  $\hat{i}$ . El raig del medi d'índex més alt és més proper a la normal (línia perpendicular al pla en el punt d'incidència)*

**Figura 6.** La velocitat de la llum depèn del medi pel qual viatja.

### 1.3.2.3. Polarització

En una ona electromagnètica, la direcció del camp elèctric és perpendicular a la direcció de propagació de la ona. Si el camp elèctric és sempre paral·lel a una línia perpendicular a la de propagació, l'ona es denomina linealment polaritzada.

Existeixen quatre fenòmens que produeixen ones electromagnètiques polaritzades a partir d'ones no polaritzades: absorció, reflexió, dispersió o *scattering* i birefringència (també anomenat doble refracció). En aquest treball de recerca només treballarem amb la polarització per absorció, així que no resulta necessari examinar els altres fenòmens.

#### 1.3.2.3.1. Polarització per absorció

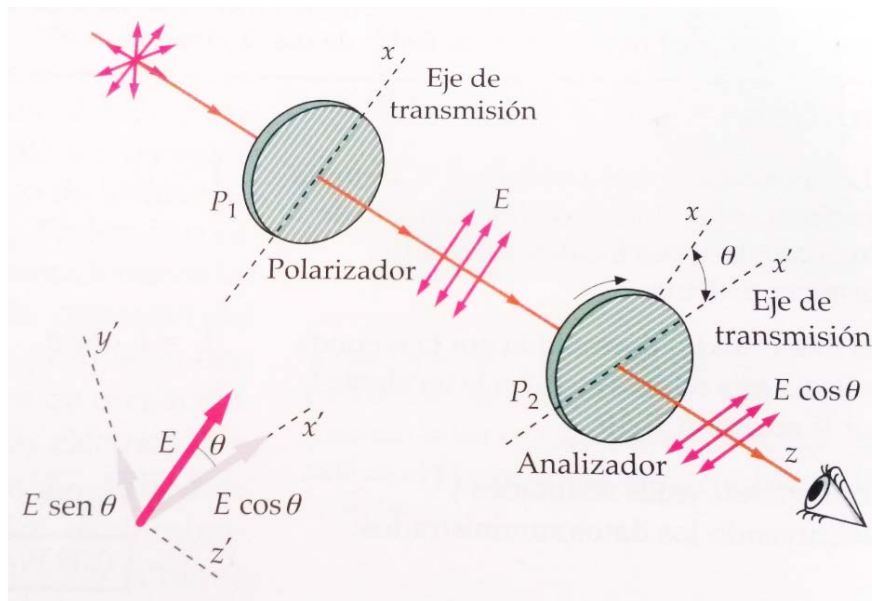
Alguns vidres presents a la natura, tallats de forma apropiada, absorbeixen i transmeten la llum de forma diferent depenent de la polarització de la llum. El 1938, el científic nord-americà Edwin Hervert **Land** (1909-1991) va inventar una pel·lícula polaritzadora simple i comercial denominada Polaroid que, de fet, farem anar en la part pràctica d'aquest projecte.

Aquest producte conté molècules d'hidrocarbur de cadena llarga que resulten alineades quan la làmina en què s'obté s'estira en una direcció durant el procés de fabricació. Quan la làmina se submergeix en una dissolució que conté iode, les cadenes es fan conductores de les freqüències òptiques. Així, quan hi incideix llum amb un vector camp elèctric paral·lel a les cadenes, s'estableixen corrents elèctriques al llarg d'aquestes i l'energia lluminosa és absorbida. Si el camp elèctric és perpendicular a les cadenes, la llum es transmet. La direcció perpendicular a les cadenes es denomina eix de transmissió.

Considerem un feix de llum no polaritzada que es propaga en direcció  $z$  i que incideix sobre una pel·lícula polaritzadora amb el seu eix de transmissió en la direcció  $x$ , com indica la figura 7. Després, el feix de llum incideix sobre una segona pel·lícula polaritzada, l'analitzador, que té un eix de transmissió que forma un angle  $\theta$  amb l'eix  $x$ . Si  $E$  és l'amplada del camp elèctric del feix que incideix sobre aquesta segona pel·lícula, la component paral·lel a l'eix de transmissió serà  $E_{\parallel} = E \cos \theta$ , i la perpendicular,  $E_{\perp} = E \sin \theta$ .

La pel·lícula absorbeix  $E_{\perp}$  i transmet  $E_{\parallel}$ , de forma que l'amplada del camp elèctric del feix transmès serà  $E_{\parallel} = E \cos \theta$  i el camp estarà polaritzat linealment en la direcció de l'eix de transmissió.





*Un raig prèviament polaritzat per una làmina polaritzadora segons el seu eix de transmissió incideix sobre una altra làmina que té un eix que forma un angle  $\theta$  respecte de la primera. Únicament la component  $E \cos \theta$  es transmet a través de la segona i el raig transmès és linealment polaritzat en la direcció de l'eix de transmissió d'aquesta segona.*

**Figura 7. Quan la llum arriba a un polaritzador, només les ones que vibren en un angle determinat aconseguen travessar el medi. La llum que emergeix es coneix com llum polaritzada en un pla.**

Quan se situen successivament al llarg d'un feix de llum dos elements polaritzadors, tal i com acabem de descriure, el primer d'ells es denomina polaritzador i el segon, analitzador. Si el polaritzador i l'analitzador estan creuats, és a dir, els seus eixos de transmissió són mútuament perpendiculars, no passarà gens de llum a través d'ells.

#### Referències bibliogràfiques:

- [1] TRIPLER, P., & MOSCA, G. (2011). *Física para la ciencia y la tecnología. Electricidad y magnetismo, luz* (Vol. 2). Barcelona: Editorial Reverté.
- [2] MERCADÉ, J., SERRA, S., & ARMENGOL, M. (2009). *FÍSICA 2 BATXILLERAT*. Madrid: McGraw-Hill Mediterrània.
- [3] *Grupo de Investigación Laboratorios Virtuales en Ciencia y Tecnología*.: Tutorial de Óptica Geométrica: ESPEJOS.
- [4] OLIVIER DARRIGOL - *A History of Optics from Greek Antiquity to the Nineteenth Century pdf* - Oxford - 1st Edition, Kindle Edition

# **2. Disseny experimental**

2.1. Polarimetria

2.2. Refractometria

# 2.1. Polarimetria

<b>2.1.1 Raonaments teòrics</b>	19
<b>2.1.2 Experiment 1.</b> Determinació experimental de la rotació específica de substàncies òpticament actives mitjançant un polarímetre de laboratori	23
<b>2.1.3 Experiment 2.</b> Determinació experimental de la concentració de sacarosa en begudes refrescants mitjançant un polarímetre de laboratori	29
<b>2.1.4 Construcció d'un polarímetre casolà</b>	36
<b>2.1.5 Experiment 3.</b> Determinació experimental de la longitud d'ona de la llum groga del nostre polarímetre casolà	44
<b>2.1.6 Experiment 4.</b> Determinació experimental de la rotació específica de substàncies òpticament actives mitjançant el nostre polarímetre casolà	52
<b>2.1.7 Experiment 5.</b> Determinació experimental de la concentració de sacarosa en begudes refrescants mitjançant el nostre polarímetre casolà	55
<b>2.1.8 Valoracions finals</b>	60

## 2.1.1. Raonaments teòrics

### 2.1.1.1. Substàncies òpticament actives

L'activitat òptica va ser descoberta a principis del segle XIX pel físic francès Jean-Baptiste **Biot** (1774-1862). Biot va observar que quan un feix de llum polaritzada travessa una dissolució de certes molècules orgàniques, com el sucre o la càmfora, el pla de polarització de la llum experimenta una rotació d'un cert nombre de graus.

El 1848, el químic francès Louis **Pasteur** (1822-1895) va arribar a la conclusió que les molècules que presenten quiralitat, és a dir, que no són superposables amb la seva imatge especular, són òpticament actives. Aquests isòmers s'anomenen enantiòmers.

Finalment, el químic holandès Jacobus Henricus van't **Hoff** (1852-1911, premi Nobel de Química 1901) va assenyalar que una molècula és asimètrica i, per tant, quiral, quan té un carboni amb 4 substituents diferents units a ell. Un àtom de carboni amb 4 grups diferents rep el nom de centre estereogènic, i acostuma a indicar-se amb un asterisc. Una molècula quiral, doncs, té un pla de simetria, un centre d'inversió i un eix impropri rotació-reflexió.

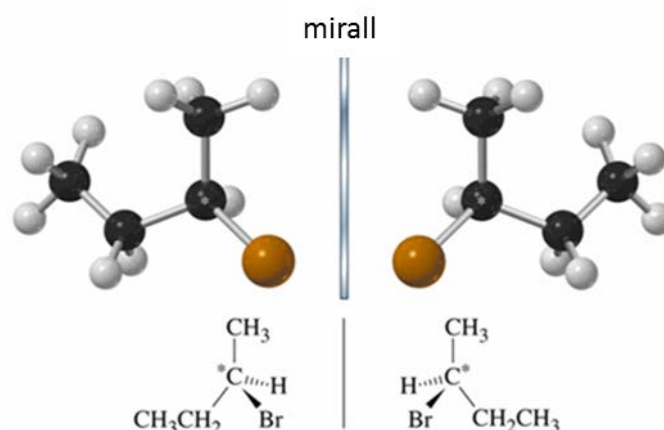


Figura 8. El carboni 2 del compost 2-bromobutà és un centre estereogènic.

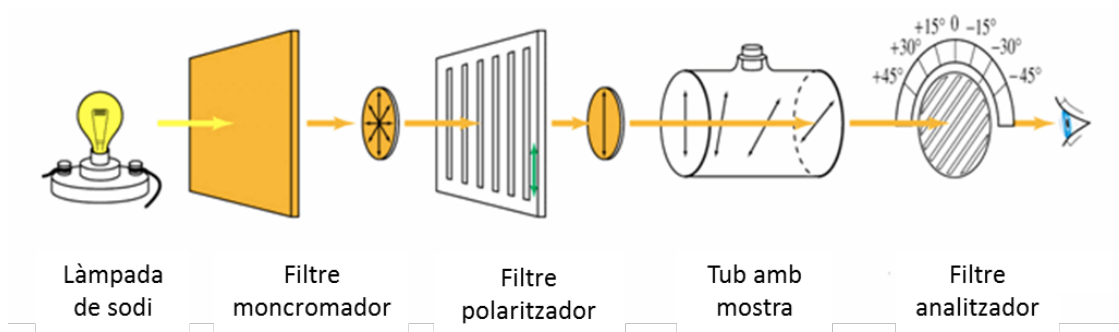
Els enantiòmers tenen propietats físiques idèntiques, exceptuant el sentit en què desvien la llum polaritzada.

### 2.1.1.2. Descripció de l'equipament de laboratori

El fenomen de la isomeria òptica es posa de manifest mesurant la rotació òptica, que és la capacitat de les substàncies asimètriques per girar el pla d'un feix de llum polaritzada. La rotació òptica pot ser mesurada mitjançant un aparell anomenat polarímetre.

Les parts fonamentals d'un polarímetre són:

- Una font de llum, generalment una làmpada de sodi.
- Un filtre polaritzador.
- Un tub per mantenir la substància (o solució) òpticament activa en el raig lluminós.
- Un filtre analitzador, que no és més que un segon filtre polaritzador.
- Una escala per mesurar el nombre de graus que el pla de la llum polaritzada ha girat.



**Figura 9. Esquema de les parts essencials de tot polarímetre.**

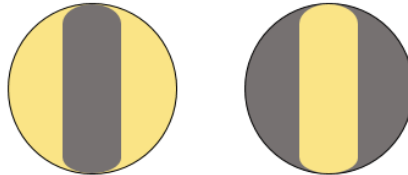
#### 2.1.1.2.1. Utilització de l'aparell

Per tal d'explicar el principi de funcionament d'aquest instrument, redactarem tot plegat com s'hi prenen mesures i què succeeix en cada procediment.



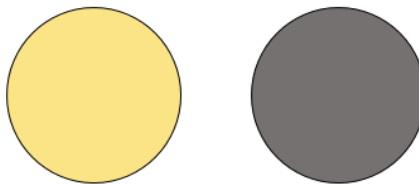
**Figura 10. Polarímetre emprat en els experiments 1 i 2**

1. S'ha de posar la substància a analitzar i observar per l'ocular (element número 1): si la substància és òpticament activa, girarà en un pla de llum polaritzada i observarem en el camp de visió dues il·luminacions diferents. Si els camps laterals estan il·luminats, el pla ha estat desviat cap a la dreta i es diu que la substància és dextrogira, assignant-li el signe (+) per conveni. Si està il·luminada la zona central, el pla ha estat desviat cap a l'esquerra, així que la substància és levogira i se li assigna el signe (-).



**Figura 11. Vista inicial d'una substància dextrogira i vista inicial d'una substància levogira.**

2. La magnitud de la rotació òptica és determinada fent rotar l'analitzador respecte el polaritzador. Així doncs, cal fer girar la rodeta (element número 3) cap a la dreta, si la substància és dextrogira, o cap a l'esquerra, si és levogira, fins aconseguir la penombra de referència.



**Figura 12. Vista de la posició zero i vista de la penombra de referència.**

3. Si és tracta d'una mostra dextrogira, la lectura és directa a l'escala graduada de Vernier. Si és levogira, cal restar-li  $180^\circ$ .
4. Anotar l'angle de rotació i repetir els procediments amb totes les dissolucions.

**Nota:** La rotació específica depèn també de la temperatura i de la longitud d'ona de la llum que s'utilitza, així que és necessari indicar-les. Per aquest motiu, tractarem de mantenir les mostres a  $20^\circ$  sempre.

També és important netejar bé el tub entre mesures amb aigua destil·lada i amb petits volums de la dissolució a mesurar, per tal d'evitar contaminacions que podrien interferir en els resultats.

### 2.1.1.2.2. Rotació específica

La rotació de la llum polaritzada per un compost és una propietat física característica del mateix, com ho són el punt d'ebullició o la densitat. La rotació observada per una determinada substància depèn de quantes molècules troba la llum en el seu camí, és a dir, depèn de la concentració de la mostra en la dissolució, de la longitud que recorre el feix de llum en la seva trajectòria i de la força de l'activitat òptica del compost.

Per tal de poder comparar la magnitud de l'activitat òptica de diferents substàncies, es defineix el terme rotació específica, simbolitzada per  $[\alpha]$ , que ve donada per l'equació de la llei de Biot:

$$[\alpha] = \frac{\alpha}{c \times l}$$

on  $\alpha$  és la rotació observada,  $c$  és la concentració de la dissolució en (g/mL) i  $l$  és la longitud del tub (dm).

---

#### Referències bibliogràfiques:

[4] OLIVIER DARRIGOL - *A History of Optics from Greek Antiquity to the Nineteenth Century pdf* - Oxford - 1st Edition, Kindle Edition

[5] *OpenCourseWare Universidad de Sevilla*. Química orgánica I, Tema 4, Lección 5: Estereoquímica I.

[6] *Wikipedia Commons*: Quiralitat (química).

[7] *Wikipedia Commons*: Specific rotation.

## 2.1.2. Experiment 1. Determinació experimental de la rotació específica de substàncies òpticament actives mitjançant un polarímetre de laboratori

### 2.1.2.1. Objectius de l'experiment

Ara que ja sabem quin és el principi de funcionament d'un polarímetre i entenem a què es deu el poder rotatori sobre la llum polaritzada de les substàncies òpticament actives, podem procedir a fer-ne anar un per tal d'aprendre a manejar-lo i, sobretot, agafar idees per construir més endavant el nostre propi polarímetre *low cost*.

En aquesta primera pràctica experimental, ens disposem a determinar la rotació específica de sucres lliures amb un poder rotatori òptic. Quan tinguem el nostre aparell casolà, farem el mateix experiment i compararem els resultats amb les dades obtingudes amb el polarímetre de laboratori.

Així doncs, ens iniciem en la part pràctica d'aquest treball de recerca amb els següents objectius:

- Aprendre a treballar amb un polarímetre de laboratori.
- Observar el poder rotatori de les substàncies òpticament actives sobre la llum polaritzada.
- Determinar la rotació específica de substàncies òpticament actives amb un polarímetre de laboratori.
- Determinar si les substàncies estudiades són levogires o dextrogires.
- Calcular l'error comès en la determinació a partir dels valors tabulats a la bibliografia.

### 2.1.2.2. Disseny de l'experiment

#### 2.1.2.2.1. Descripció de l'experiment

Dedicarem aquest apartat a fer un petit avenç de la informació que exposarem en la secció dels procediments, és a dir, farem una descripció breu i a grans trets dels passos que cal seguir per determinar la rotació específica de substàncies òpticament actives, tot servint-nos d'un polarímetre de laboratori.

En primer lloc, prepararem 5 dissolucions al 10% p/v de diverses substàncies òpticament actives: sacarosa, glucosa, lactosa i fructosa. Un cop preparades, mesurarem l'angle de rotació de la llum polaritzada de les diferents mostres al polarímetre. Farem dues lectures polarimètriques de mostra i en calcularem la mitjana aritmètica. Per obtenir els valors de la rotació específica de cada substància, aplicarem l'equació definida per la **lleï de Biot** que ja vam esmentar en l'apartat del marc teòric.

Finalment, compararem els nostres resultats amb els tabulats a la bibliografia, calcularem l'error absolut i l'error relatiu comès en cada determinació i determinarem també si són substàncies levogires o dextrogires.



La següents taules mostren les fórmules estructurals de les substàncies emprades. Com podem veure, totes aquestes molècules estan formades per més d'un carboni asimètric, fet que explica la seva quiralitat i, conseqüentment, la seva activitat òptica.

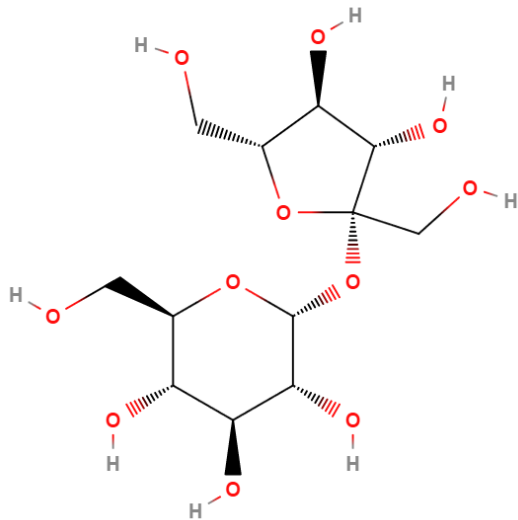


Figura 13. Fórmula estructural de la sacarosa.

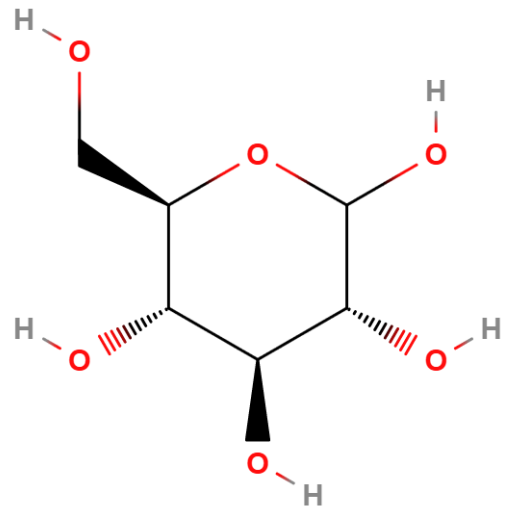


Figura 14. Fórmula estructural de la glucosa.

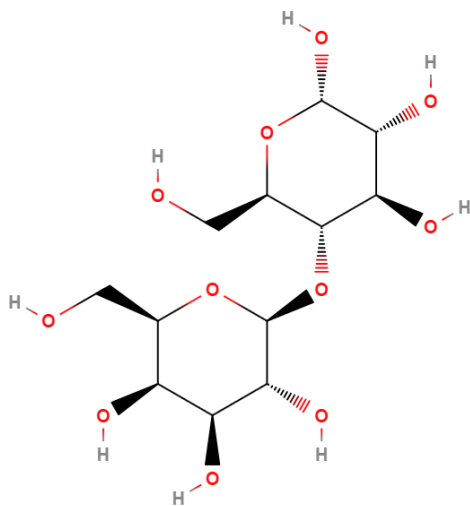


Figura 15. Fórmula estructural de la lactosa.

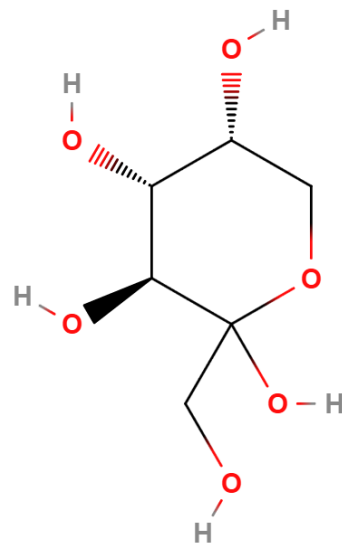


Figura 16. Fórmula estructural de la fructosa.

### 2.1.2.2.2. Utilatge i reactius

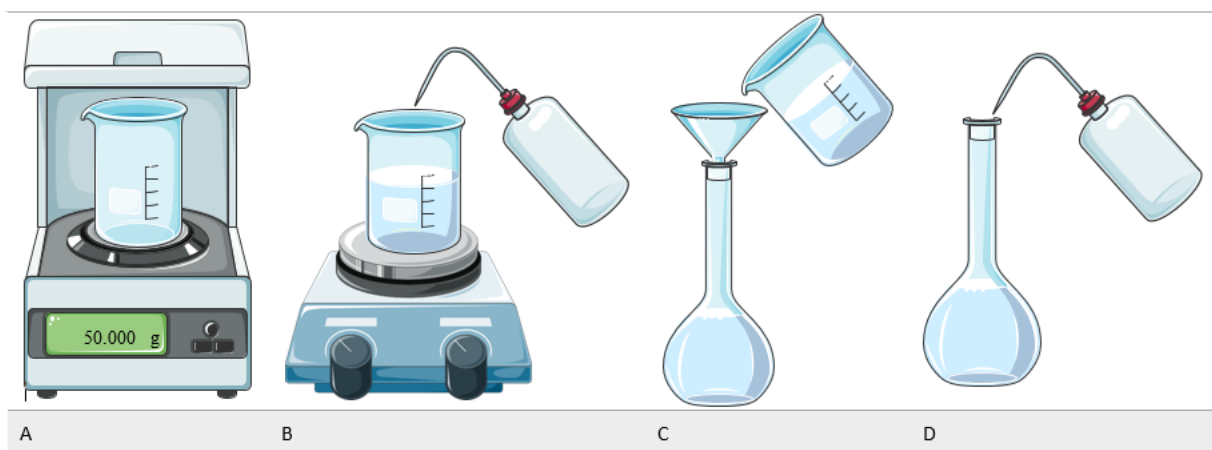
- 4 vasos de precipitats
- balança
- agitador magnètic
- 1 embut
- 4 matrassos aforats de 500mL
- 1 cullereta
- polarímetre de laboratori
- aigua destil·lada
- sacarosa
- glucosa
- lactosa
- fructosa

### 2.1.2.2.3. Procediments

#### a) Preparació de dissolucions

Primerament, cal preparar les dissolucions al 10% p/v de sacarosa, glucosa, lactosa i fructosa. Tot i que la capacitat del tub polarimètric és de menys de 20 mL, les farem de 500 mL per tal de reutilitzar-les en futurs experiments. Aquests són els passos a seguir per fer-ho:

1. Pesar 50 g de reactiu en un vas de precipitats tarat a la balança
2. Afegir-hi una mica d'aigua i dissoldre-ho a l'agitador magnètic
3. Abocar-ho en un matràs aforat de 500 ml amb un embut
4. Afegir aigua de nou al vas de precipitats i abocar-la al matràs aforat diverses vegades per tal de no perdre solut durant el procediment
5. Acabar d'afegir aigua al matràs aforat fins a l'entrà



**Figura 17. Esquema dels passos a seguir per preparar dissolucions en pes/volum.**

b) Lectura de l'angle de rotació òptica i determinació del sentit de rotació òptica

Aquests procediments ja van ser descrits en la secció corresponent als Raonaments teòrics (vegem pàgina 22).

c) Càlcul de la rotació específica

A partir de les dades de la rotació òptica obtingudes, calcularem la rotació específica de cada substància aplicant l'equació definida per la llei de Biot:

$$[\alpha] = \frac{\alpha}{c \times l}$$

tenint en compte que la concentració s'ha de donar en g/mL i la longitud del tub en dm.

Per exemple, l'angle de rotació òptica de la glucosa ha estat de 10°. Així doncs, recordant que el tub polarimètric mesura 20 cm de llargada, el càlcul de la rotació específica serà:

$$[\alpha] = \frac{10^\circ}{\frac{10 \text{ g}}{100 \text{ mL}} \times 2 \text{ dm}} = 50^\circ.$$

### 2.1.2.3. Resultats obtinguts

Inicialment, presentarem en una taula la mitjana aritmètica resultant de les dues lectures polarimètriques de l'angle de rotació de cadascuna de les dissolucions preparades al 10% p/v.

Substància òpticament activa	Angle de rotació $\bar{\alpha}$
Sacarosa	13,7°
Glucosa	10°
Lactosa	10°
Fructosa	-18,5°

Tot seguit, mostrem en una segona taula la rotació específica de cada substància calculada a partir dels resultats anteriors i l'equació definida per la llei de Biot, a més del seu sentit de rotació. Recordem que si les mostres desvien la llum polaritzada en el sentit de les agulles del rellotge són dextrogires(+) i, en cas contrari, són levogires(-).

Substància òpticament activa	Rotació específica [ $\alpha$ ]	Dextrogira o levogira
Sacarosa	68,5°	Dextrogira
Glucosa	50,0°	Dextrogira
Lactosa	50,0°	Dextrogira
Fructosa	-92,5°	Levogira

Per acabar, aquesta última graella mostra l'error absolut i relatiu comès en cada determinació a partir de les dades reals tabulades a la bibliografia.

Substància òpticament activa	Rotació específica [ $\alpha$ ]	Dada bibliogràfica	Error absolut	Error relatiu
Sacarosa	68,5°	66,4°	2,1°	3%
Glucosa	50,0°	52,7°	2,7°	5%
Lactosa	50,0°	52,3°	2,3°	4%
Fructosa	-92,5°	-92,0°	0,5°	0%
			$\overline{E}_a = 1,9^\circ$	$\overline{E}_r = 3\%$

### 2.1.2.4. Conclusions de l'experiment

En aquest darrer apartat valorarem si vam assolir els objectius que ens havíem proposat a l'inici de la pràctica:

- Aprendre a treballar amb un polarímetre de laboratori.
- Observar el poder rotatori de les substàncies òpticament actives sobre la llum polaritzada.
- Determinar la rotació específica de substàncies òpticament actives amb un polarímetre de laboratori.
- Determinar si les substàncies estudiades són levogires o dextrogires.
- Calcular l'error comès en la determinació a partir dels valors tabulats a la bibliografia.

Tot i que al principi va resultar costós, vam aprendre a fer anar un polarímetre de laboratori i vam entendre millor el seu principi de funcionament.

Així mateix, vam poder apreciar el poder rotatori de la sacarosa, la glucosa, la fructosa i la lactosa i vam ser capaços de determinar la seva rotació específica molt satisfactòriament, ja que només vam cometre un error relatiu del 3%.

Pel que fa al sentit del poder rotatori òptic, vam poder concloure que tant la sacarosa com la glucosa i la lactosa són dextrogires, mentre que la fructosa és levogira.

## 2.1.3. Experiment 2. Determinació experimental de la concentració de sacarosa en begudes refrescants mitjançant un polarímetre de laboratori

### 2.1.3.1. Objectius de l'experiment

Aquest segon experiment no té uns objectius gaire diferents de l'anterior. Volem seguir treballant amb un polarímetre per tal d'agafar pràctica, acabar de comprendre com funciona i adquirir els coneixements necessaris per dur a terme la següent pràctica: la construcció del nostre polarímetre casolà.

En aquest cas, però, com ja hem après a fer anar correctament l'aparell, ens dedicarem a determinar la concentració de sacarosa en begudes refrescants. De la mateixa forma que en l'experiment 1, enregistrarem aquestes dades per comparar-les amb els resultats que obtindrem amb la nostra versió.

En resum, els objectius presentats són:

- Determinar la concentració de sacarosa en begudes refrescants de diferents marques amb un polarímetre de laboratori.
- Calcular l'error comès en la determinació a partir de la informació nutricional dels productes.

### 2.1.3.2. Disseny de l'experiment

#### 2.1.3.2.1. Descripció de l'experiment

Per determinar la concentració de sacarosa en refrescos, primerament cal preparar dissolucions patró de sacarosa. En farem del 20%, 15%, 10% i 5% en pes. A continuació, mesurarem l'angle de rotació òptica de cadascuna d'aquestes dissolucions al polarímetre i n'anotarem el resultat. Un cop fet això, podrem passar a mesurar l'angle de rotació òptica dels refrescos.

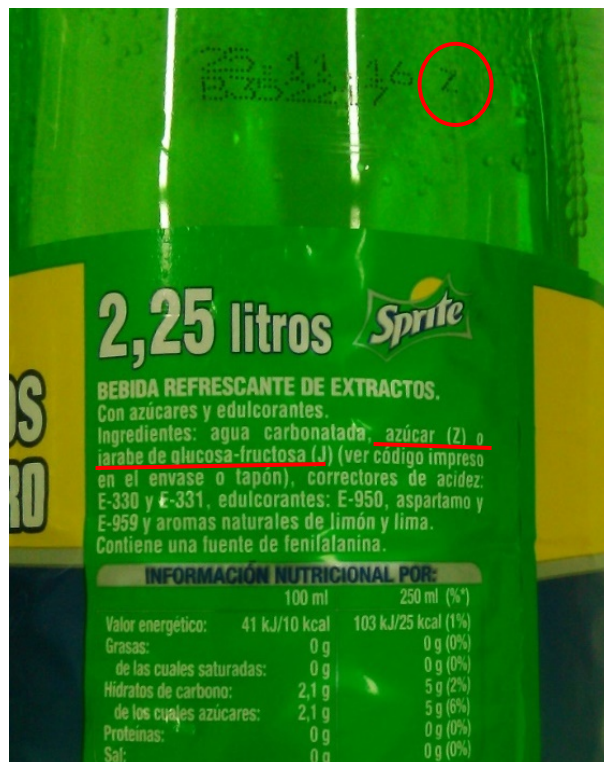
Finalment, posarem en relació els resultats obtinguts de les dissolucions de concentració coneguda amb els resultats de les diferents begudes i estimarem la seva concentració de sacarosa. També calcularem els errors absolut i relatiu comesos a partir de les dades del contingut de sucre expressades en la informació nutricional dels productes.

#### 2.1.3.2.2. Utilatge i material

- vasos de precipitats
- balança
- agitador magnètic
- embut
- matrassos aforats de 500mL
- cullereta
- polarímetre de laboratori
- aigua destil·lada
- sucre
- refrescos de diferents marques

És important que les begudes no tinguin color o siguin força translúcides i assegurar-se que no continguin xarops de glucosa o fructosa ni variants similars que tenen un poder rotatori diferent del de la sacarosa, ja que els resultats es veurien alterats.

Nosaltres hem triat les següents marques: 7up, Sprite, Aquarius llimona, Hacendado bebida para deportistas taronja, Burn, llimonada Don Simón i Nestea.



**Figura 18. Informació nutricional de la beguda marca Sprite. Com es pot veure, ens hem de fixar que el codi imprès a l'envàs contingui una Z per tal d'assegurar-nos que el refresc conté sacarosa, en lloc de glucosa o fructosa.**

### 2.1.3.2.3. Procediments

#### a) Preparació de dissolucions

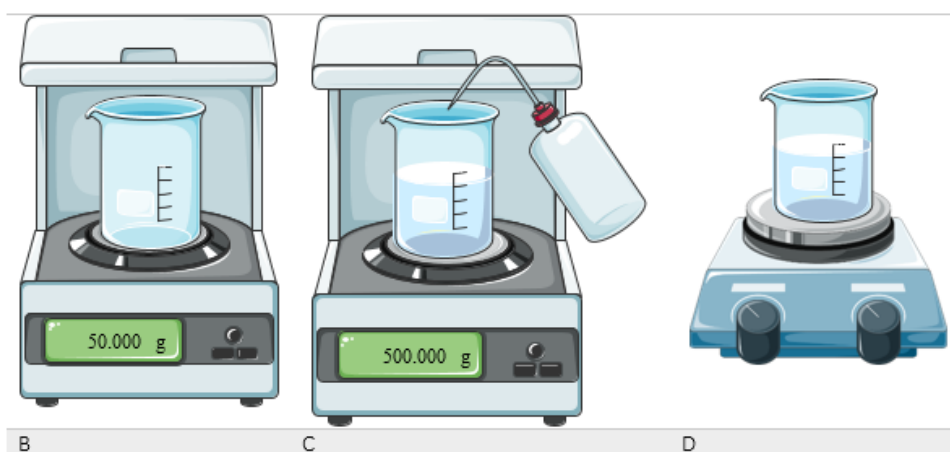
Tal i com vam fer en l'experiment 1, prepararem dissolucions patró de 500 g per tal de no haver de repetir la preparació de les dissolucions patró en els experiments que realitzarem amb el nostre polarímetre *low cost*.

1. En primer lloc, hem de calcular la quantitat de sucre necessària per a cada dissolució aplicant un simple factor de conversió (percentatge × grams de dissolució):

$$\frac{\text{grams de sucre}}{100 \text{ g de dissolució}} \times 500 \text{ g de dissolució} = ? \text{ grams de sucre necessaris}$$

Concentració de la dissolució	Solut necessari
20%	100 g
15%	75 g
10%	50 g
5%	25 g

2. Pesar la quantitat de solut necessària en un vas de precipitats amb l'ajuda una balança, havent tarat, per suposat, el pes del recipient.
3. Afegir-hi aigua destil·lada fins que la balança marqui 500g.
4. Mesclar bé la dissolució en un agitador magnètic.



**Figura 19. Esquema dels passos a seguir per preparar dissolucions en tant per pes.**

b) Lectura de l'angle de rotació òptica

A continuació, hem de llegir l'angle de rotació òptica tant de les dissolucions patró com de les begudes refrescants escollides. Per fer-ho, només cal seguir els procediments indicats en l'apartat corresponent dels Raonaments teòrics (vegem pàgines 19-22).

c) Determinació de la concentració de sacarosa

1. Disposar les dades corresponents a la rotació òptica de cadascuna de les dissolucions patró en una taula d'un full de càlcul Excel.
2. Fer una altra taula amb els resultats obtinguts per a les begudes triades.

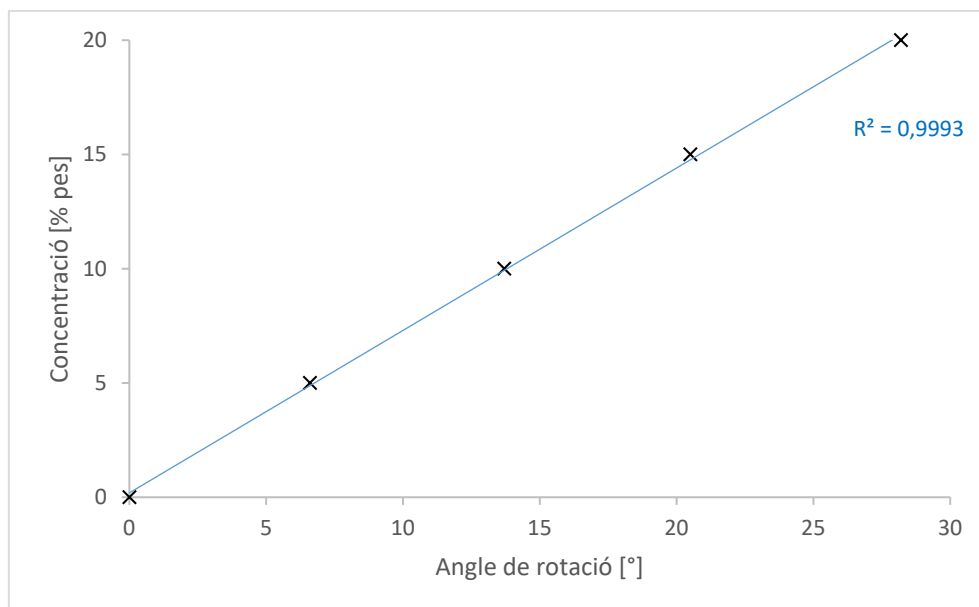




### 2.1.3.3. Resultats obtinguts

La taula següent mostra l'angle de rotació òptica mesurat per a cada dissolució de diferent concentració en el polarímetre. És el resultat de la mitjana aritmètica de dues lectures. Tot seguit trobem representada en un gràfic la línia de tendència corresponent, en què el coeficient de correlació lineal és gairebé 1.

Concentració de la dissolució patró en pes	Angle de rotació ( $\bar{\alpha}$ )
0%	0,0°
5%	6,6°
10%	13,70°
15%	20,50°
20%	28,20°



Malgrat la perfecta relació entre les dades de les dissolucions patró, només vam poder estudiar 2 refrescos triats, els únics totalment incolor. Aquestes són les dades obtingudes:

Beguda refrescant	Angle de rotació ( $\bar{\alpha}$ )
<b>7up</b>	11,0°
<b>Sprite</b>	2,2°

Mitjançant la funció PRONÓSTICO d'Excel, hem estat capaços de posar aquestes dades en relació amb les obtingudes per a les dissolucions de concentració coneguda i hem estimat el percentatge del contingut de sacarosa de les dues begudes que hem pogut estudiar.

Comparant-les amb els valors indicats en les seves respectives etiquetes d'informació nutricional, també hem calculat l'error absolut i l'error relatiu comesos en aquesta determinació experimental. Podem veure els resultats obtinguts en la següent graella:

Beguda refrescant	Contingut de sacarosa estimat en 100 g de mostra	Contingut de sacarosa real en 100 g de mostra	Error absolut	Error relatiu
<b>7up</b>	8,0 g	11,0 g	3,0 g	27%
<b>Sprite</b>	1,8 g	2,1 g	0,3 g	14%
			$\bar{E}_a = 1,7 \text{ g}$	$\bar{E}_r = 21\%$

### 2.1.3.4. Conclusions de l'experiment

Per tal d'extreure unes conclusions de la pràctica realitzada, és convenient recordar les qüestions que ens havíem plantejat en un principi:

- Determinar la concentració de sacarosa en begudes refrescants de diferents marques amb un polarímetre de laboratori.
- Calcular l'error comès en la determinació a partir de la informació nutricional dels productes.

Resulta que, malauradament, només vam ser capaços de determinar la concentració de sacarosa de dues de les set begudes que vam triar, 7up i Sprite, que eren les úniques que no porten colorants. Davant la resta de begudes, el camp de visió era pràcticament nul i no se'n va poder fer cap determinació.

Pel refresc 7up, l'error relatiu va estar del 27%, mentre que pel refresc Sprite va estar del 14%.

S'observa que l'error absolut no va ser gaire gran en cap dels dos casos, però com la concentració de sucre d'aquestes begudes no és molt elevada, aquest petit error absolut es tradueix en un error relatiu alt.

## 2.1.4. Construcció d'un polarímetre casolà

### 2.1.4.1. Objectius de l'experiment

Un cop havent experimentat amb un polarímetre de laboratori i explicada la part més elemental i teòrica necessària, podem passar a la presentació d'un disseny experimental per a la construcció d'un polarímetre casolà.

Aquest protocol inclou el material necessari, els plànols i els procediments que s'han de seguir per muntar-lo. El fet que funcioni correctament és una de les bases principals d'aquest treball de recerca, ja que, a partir de les lectures que hi farem, calcularem la rotació específica de substàncies òpticament actives, determinarem si són levogires o dextrogires, mesurarem l'angle de rotació de dissolucions de concentracions diferents, i la concentració de sacarosa en diverses begudes refrescants.

En resum, els objectius d'aquesta part experimental són els següents:

- Posar en pràctica els nostres coneixements teòrics sobre la polarimetria.
- Construir un polarímetre casolà amb un baix pressupost i materials del laboratori de l'institut.

### 2.1.4.2. Disseny de l'experiment

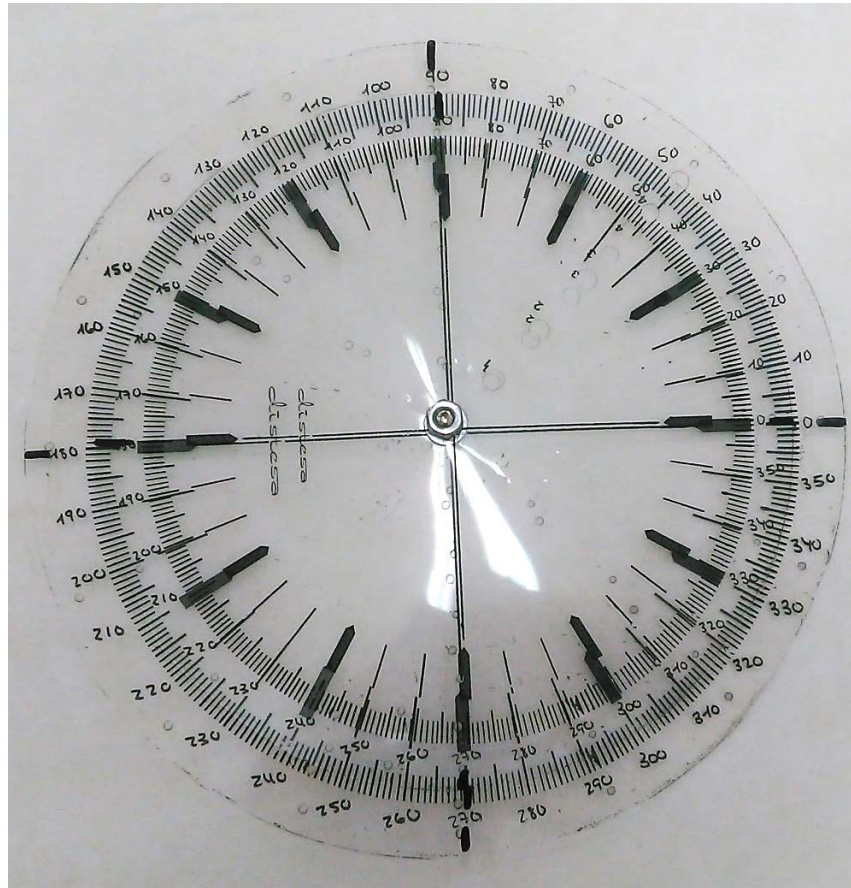
#### 2.1.4.2.1. Material

- tub de vidre de fons pla i d'11 cm d'alçada
- cartó
- tisoires
- pistola de silicona
- regle
- 2 làmines de paper Polaroid
- polarímetre de laboratori
- paper d'acetat
- 2 cargols
- cinta adhesiva
- 1 retolador permanent
- 1 pantalla blanca d'almenys 1mx1m.
- 1 projector de transparències
- 1 placa de petri

#### 2.1.4.2.2. Muntatge

Els passos del muntatge que hem seguit han estat els següents:

1. Dibuixar en un full de paper una circumferència d'uns 15 cm de diàmetre i graduar-la en graus sexagesimals. Fer dues fotocòpies en paper d'acetat, fent una reducció del 5% en una d'elles. Unir les dues circumferències amb un petit cargol pel centre, disposant així un goniòmetre.
2. Enganxar al vidre del projector de transparències el goniòmetre. Aquest serà el nostre sistema de mesura, així que només s'ha d'unir la circumferència gran amb cinta adhesiva al vidre del projector, de manera que la petita quedi mòbil i pugui rotar sobre si mateixa.



**Figura 22. Dues circumferències de paper d'acetat graduades en graus sexagesimals i unides per un petit cargol.**

3. Construir una estructura de suport de cartó en forma de tauleta d'uns 12 cm d'alçada per una de les làmines de *polaroid*. Podem servir-nos de silicona per unir les peces de l'estructura. Aquesta làmina farà la funció de filtre polaritzador, així que ha de quedar fixa respecte l'altra làmina, el filtre analitzador.
4. Enganxar en una placa de petri un filtre de color groc amb cinta adhesiva i disposar-la, cap per avall, en el centre del goniòmetre. Així imitem la llum emesa per una làmpada de sodi, que és aquella a partir de la qual es defineix la rotació específica.
5. Adherir també per sobre del filtre groc el una làmina de paper *polaroid*, que serà a partir d'ara el filtre analitzador.
6. Fer una marca en el tub de vidre que indiqui el punt de 10 cm d'alçada. Quan fem les lectures polarimètriques, disposarem el tub amb la dissolució a estudiar sobre la placa de petri. Haurà de quedar de manera que, en girar la circumferència graduada petita del goniòmetre, roti amb ella també la placa de petri i la cubeta.

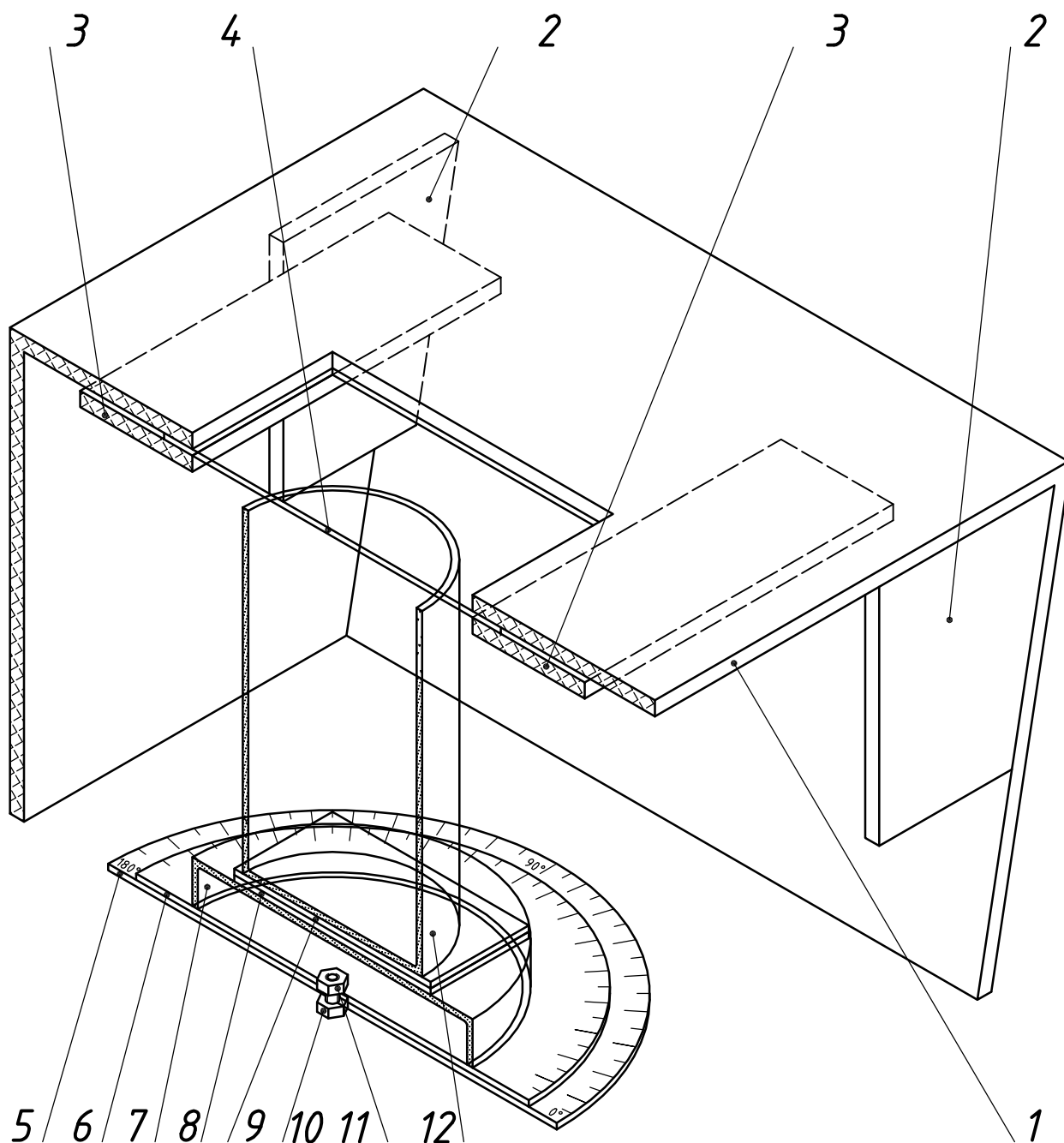
### 2.1.4.2.3. Utilització de l'aparell

Quant a la utilització de l'aparell, el procediment a seguir és el següent:

1. Assegurar-se que la placa de petri està col·locada de manera que el filtre analitzador es troba paral·lel al filtre polaritzador, és a dir, veure que es projecta la llum sense problema sobre la pantalla blanca.

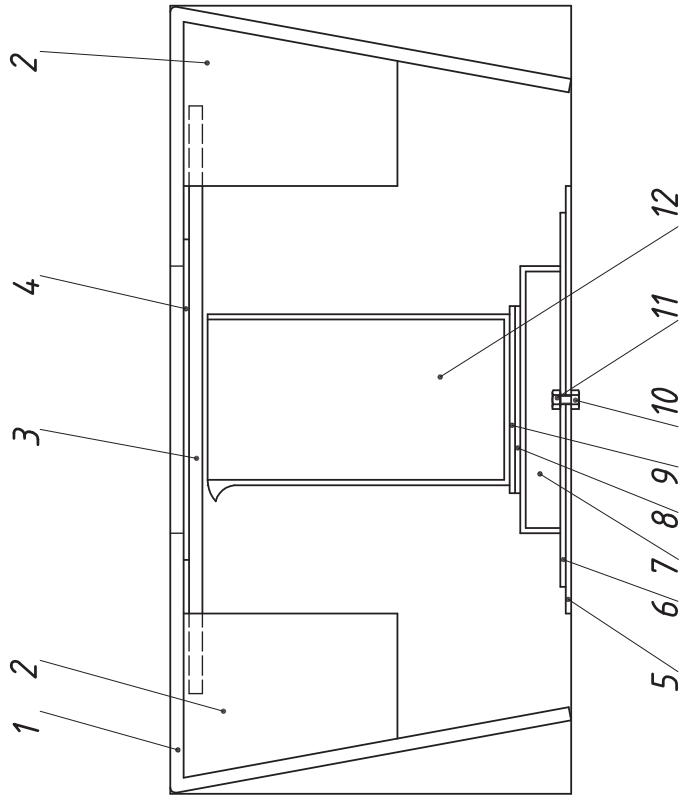
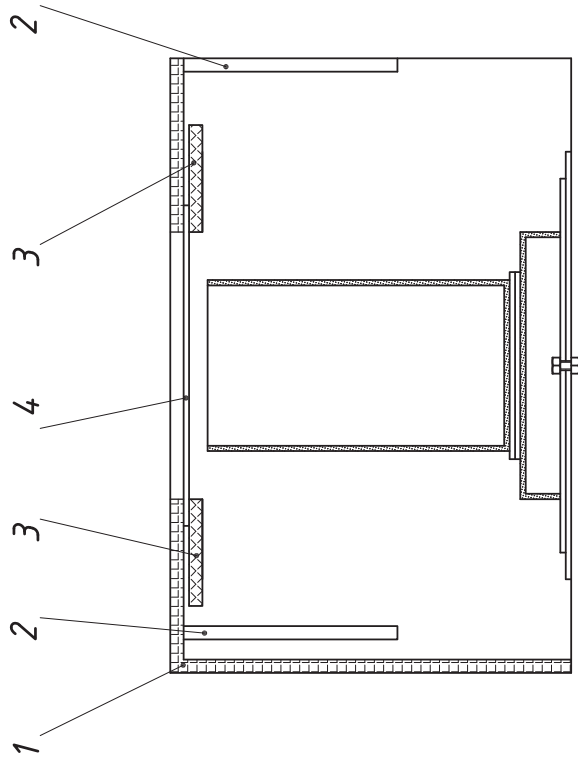
2. Marcar amb un retolador permanent un ratlla en el goniòmetre i una ratlla en la placa de petri per tal de fer-los coincidir sempre a l'inici de totes les mesures.
3. Omplir la cubeta amb la dissolució a estudiar i disposar-la sobre la placa de petri.
4. Girar la circumferència mòbil del goniòmetre, que farà girar també el tub amb el filtre analitzador a la base, fins aconseguir la foscor total en la pantalla blanca. Per acabar, només cal observar quants graus ha hagut de girar la circumferència mòbil respecte a la fixa i anotar el resultat obtingut.
5. Generalment, en ser un aparell poc precís, veurem que en un tram d'uns  $5^\circ$  el camp de visió ja és nul. En aquests casos, anotarem els dos graus de marge en què no s'hi veu gens de llum, i en calcularem la mitjana aritmètica. Per exemple, si el camp visual és tot fosc en el tram dels  $15^\circ$  a  $20^\circ$ , prendrem com a mesura  $17,5^\circ$ .
6. Si la mostra és una substància dextrogira, s'ha de fer girar en el sentit de les agulles del rellotge i la lectura de l'angle és directa. Si és levogira, ha de rotar en el sentit contrari a les agulles del rellotge, així que s'han de restar  $180^\circ$  a la lectura.

A les pàgines següents, es presenta els plànols i disseny del nostre polarímetre i les imatges del mateix, un cop construït.



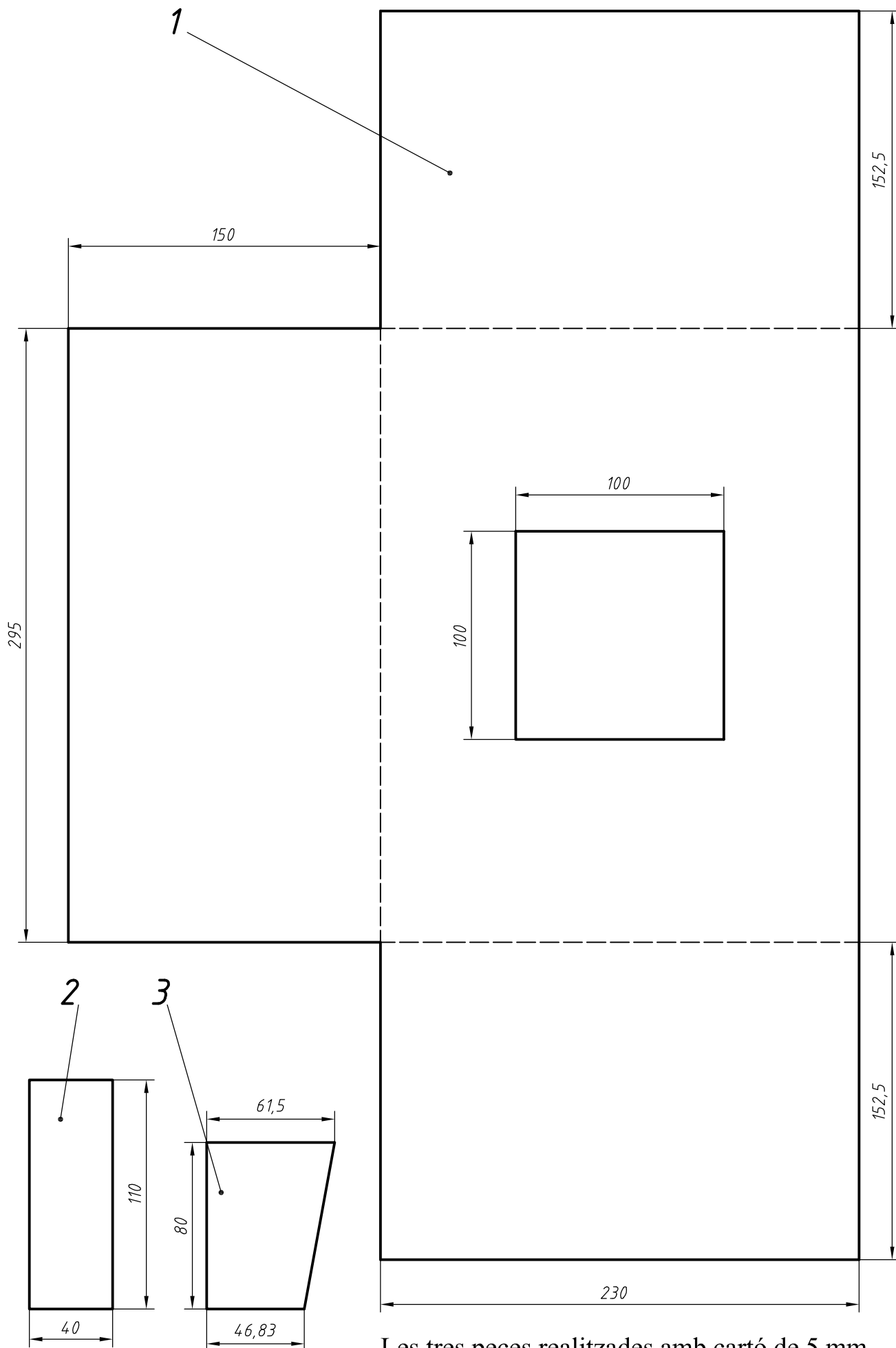
1	Cubeta	Vidre	12	∅60x110
1	Femella hexagonal M 3,5		11	
1	Cargol hexagonal M 3,5x3		10	
1	Filtre analitzador		9	
1	Filtre groc		8	
1	Placa de petri	Vidre	7	
1	Cercle graduat superior		6	
1	Cercle graduat inferior		5	
1	Filtre polaritzador		4	
2	Guies subjecció filtre polaritzador	Cartó	3	110x40x5
4	Reforç lateral de l'estructura	Cartó	2	
1	Estructura	Cartó	1	295x150x230
<b>N. de peces</b>	<b>Denominació</b>	<b>Material</b>	<b>Senyal</b>	<b>Dimensions</b>
<b>POLARÍMETRE</b>				





1	Cubeta	Vidre	12	Ø60x110
1	Femella hexagonal M 3,5		11	
1	Cargol hexagonal M 3,5x3		10	
1	Filtre analitzador		9	
1	Filtre groc		8	
1	Placa de petri	Vidre	7	
1	Cercle graduat superior		6	
1	Cercle graduat inferior		5	
1	Filtre polaritzador		4	
2	Guies subjecció filtre polaritzador	Cartó	3	110x40x5
4	Reforç lateral de l'estructura	Cartó	2	
1	Estructura	Cartó	1	295x150x230
N. de peces				
Denominació		Material	Senyal	Dimensions

**POLARÍMETRE**



Les tres peces realitzades amb cartó de 5 mm.

## EL NOSTRE POLARÍMETRE *LOW COST*, DE FABRICACIÓ PRÒPIA (vistes general i interior)



Figura 23. Vista general. El projector és alhora la base del giny i la font de llum.

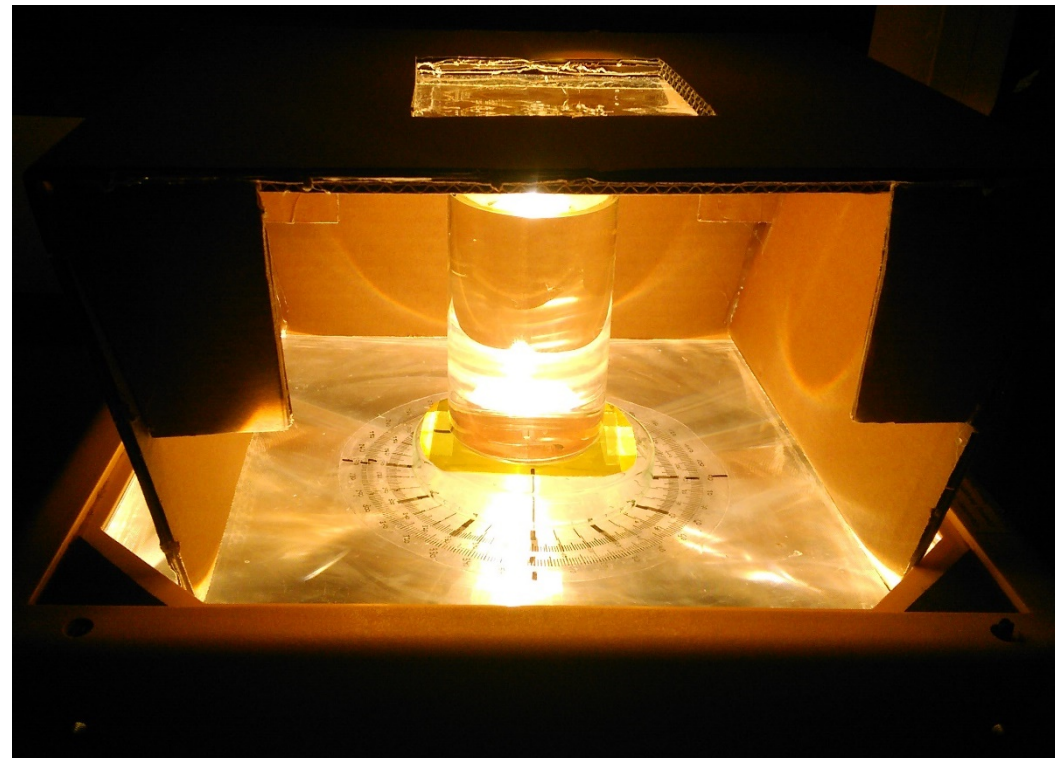
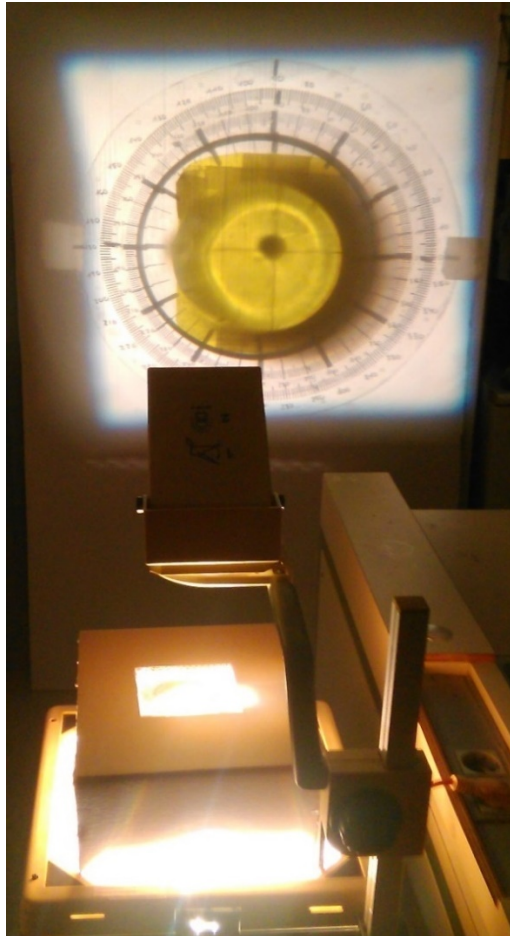
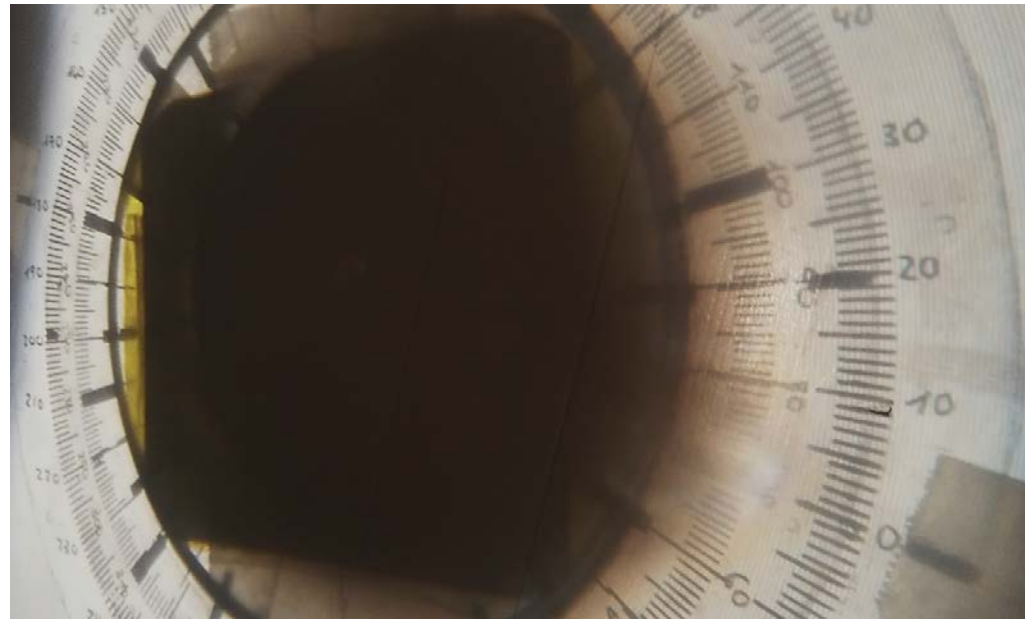


Figura 24. Vista interior. Hi veiem, de baix a dalt: font de llum (projector de transparències), goniòmetre, placa de petri amb filtre groc, filtre analitzador, cubeta de 10cm d'alçada, suport de cartó pel filtre polaritzador.



**Figura 25. Polarímetre en funcionament. Camp de visió de llum màxima sobre la pantalla blanca.**

## **EL NOSTRE POLARÍMETRE *LOW COST*, DE FABRICACIÓ PRÒPIA (vistes del seu funcionament)**



**Figura 26. Exemple d'una mesura polarimètrica en què el camp visual és tot fosc en havent rotat 20° el filtre analitzador.**

## 2.1.5. Experiment 3. Determinació experimental de la longitud d'ona de la llum groga del nostre polarímetre casolà

### 2.1.5.1. Objectius de l'experiment

En aquest disseny experimental ens disposem a estudiar una variable que podria interferir en els resultats dels experiments que més endavant durem a terme amb el nostre polarímetre casolà. Es tracta de la font de llum del projector de transparències.

En l'experiment 4 determinarem els valors de la rotació específica de diverses substàncies òpticament actives. Aquesta és una propietat definida a partir de la llum emesa per una làmpada de sodi en un polarímetre. El nostre polarímetre casolà consta, però, d'un filtre groc que només tracta d'imitar aquesta llum. És per aquest motiu que aquesta pràctica experimental té com a finalitat calcular la longitud d'ona de la llum groga que nosaltres utilitzem i així comprovar si realment se situa en valors propers als de la llum emesa per una làmpada de sodi (589nm). Per realitzar aquesta determinació ens servirem d'una xarxa de difracció.

Els objectius són, per tant:

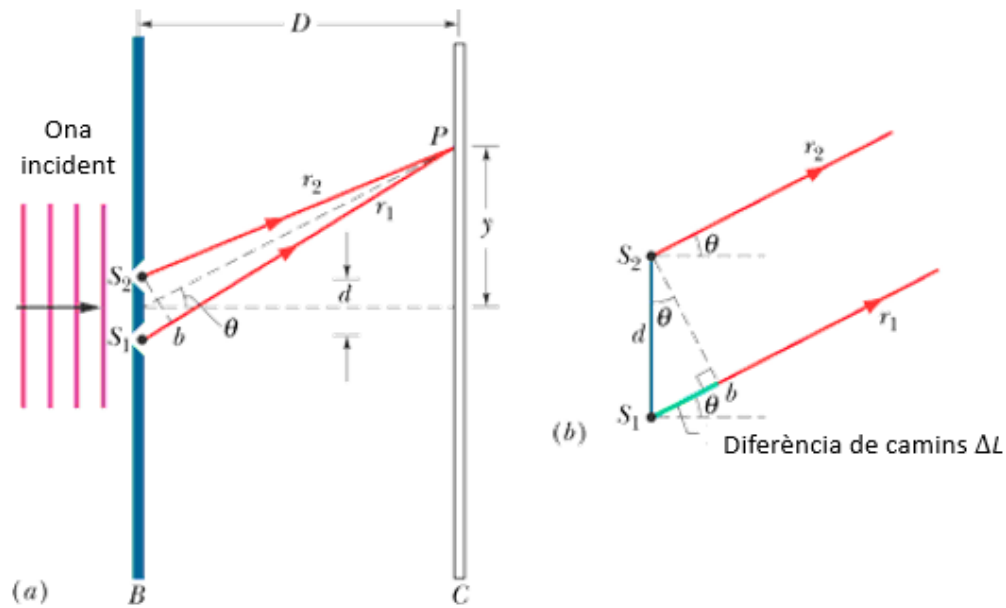
- Ampliar i posar en pràctica els nostres coneixements teòrics sobre el fenomen de la difracció de la llum.
- Fer un muntatge experimental que ens permeti determinar la longitud d'ona del filtre groc que utilitzem en el nostre polarímetre.
- Comparar el resultat obtingut i calcular-ne l'error respecte la dada real de la longitud d'ona d'una làmpada de sodi.

### 2.1.5.2. Disseny de l'experiment

#### 2.1.5.2.1. Raonaments teòrics i descripció de l'experiment

En el muntatge experimental d'aquesta pràctica necessitarem una xarxa de difracció, que ve a ser un conjunt repetitiu d'elements difractors igualment espaiats que produeixen alteracions periòdiques a la fase i/o amplada de l'ona lluminosa en estudi.

Per entendre millor el funcionament d'una xarxa de difracció, és convenient recordar primer l'experiment de Young. Aquest experiment consisteix en crear interferències fent passar dos feixos de llum per dues petites obertures paral·leles, separades per una distància  $d$ , de manera que incideixen en una pantalla blanca situada a una distància  $D$ . La figura següent representa amb molta aproximació el que succeeix:



**Figura 27. Representació de dos feixos de llum passant per dues petites obertures paral·leles.**

- (a) Llum incidint sobre la doble escltixa  $B$  provocant els raigs  $r_1$  i  $r_2$ , corresponents a ones secundàries que interfereixen constructivament en el punt  $P$  de la pantalla  $C$ .
- (b) Quan la distància  $D$  entre la pantalla i la doble escltixa és molt més gran que la separació entre  $d$  entre les escltixes ( $D \gg d$ ), els raigs  $r_1$  i  $r_2$  són paral·lels i la diferència de camins recorreguts ve donada per:

$$r_1 - r_2 = d \sin \theta$$

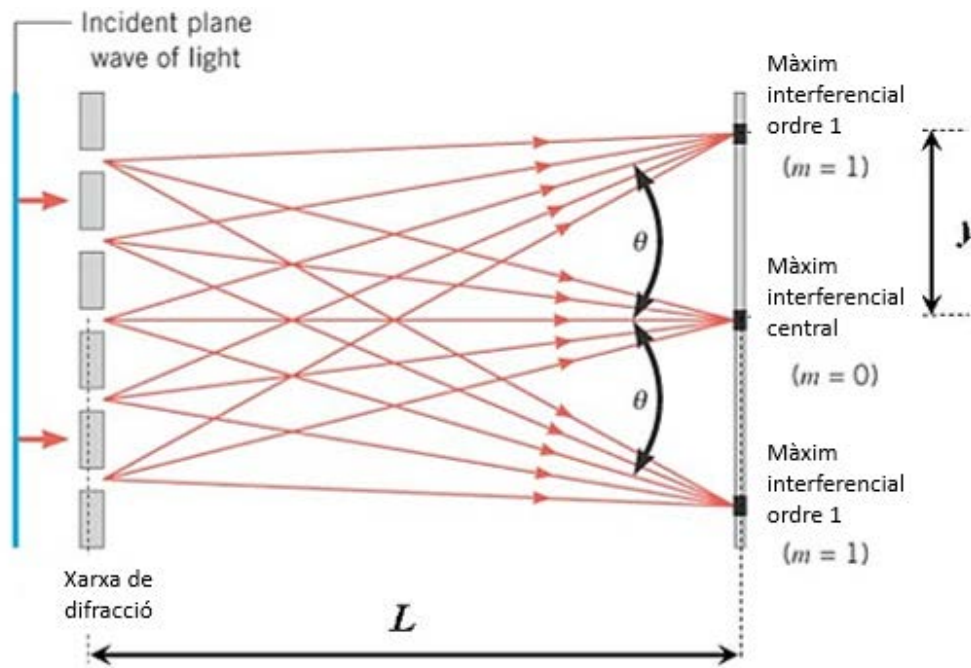
Si els raigs estan en fase quan passen a través de les escltixes, la condició per la interferència constructiva de la pantalla és:

$$d \sin \theta = m \lambda$$

on  $m$  és un nombre enter que representa l'ordre del màxim interferencial i  $\lambda$  la longitud de l'ona.

Els punts d'interferència constructiva apareixen com bandes lluminoses a la pantalla, produint un màxim, i els punts d'interferència destructiva apareixeran com bandes fosques, produint un mínim. Són denominades franges d'interferència.

Ara bé, tenint en compte que, en les xarxes de difracció, el nombre  $N$  d'escltixes és generalment gran i l'espaiament  $d$  és negligible davant la distància  $D$ , podem representar la situació amb la figura següent:



**Figura 28. Representació de dos feixos de llum passant per una xarxa de difracció.**

Considerant la figura, i suposant que l'angle  $\theta$  és petit, de l'equació anterior obtenim:

$$d \frac{y}{D} = m \lambda$$

on  $y$  és la distància del punt central ( $m=0$ ) i  $D$  és la separació de la xarxa de difracció a la pantalla.

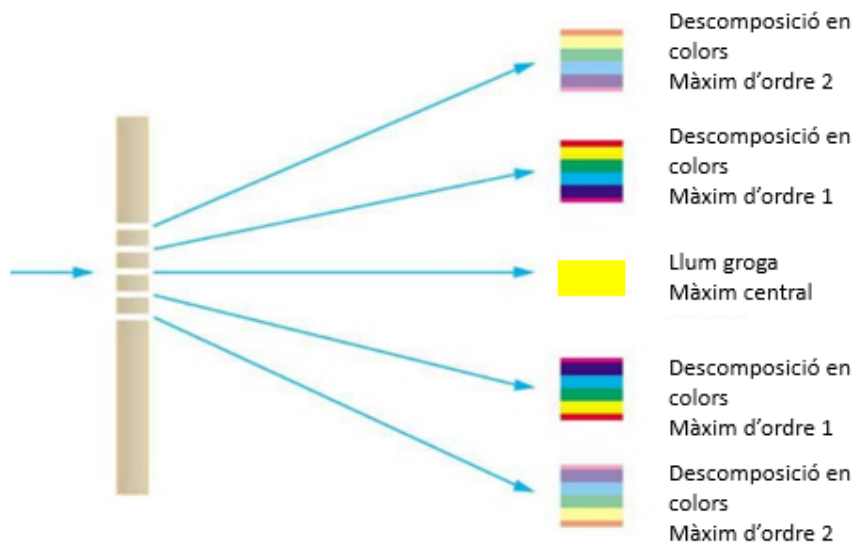
A partir d'aquesta equació, podem desenvolupar-ne un altra que ens permet determinar la longitud d'ona  $\lambda$ . Si anomenem  $y$  la separació entre dos màxims consecutius:

$$\lambda = d \frac{\Delta y}{D}$$

En el nostre cas,  $d$  és coneguda (la constant de la xarxa  $a = \frac{1\text{mm}}{999 \text{ esclertes}}$ ), però en un cas general pot ser determinada aproximadament amb un microscopi. La distància  $D$  es mesura amb una cinta mètrica (si s'escau, amb un peu de rei) i  $\Delta y$  s'obté mesurant directament sobre la pantalla la longitud abastada pels dos màxims.

En utilitzar moltes esclertes, aconseguim una interferència destructiva més gran. D'altra banda, els màxims són molt més brillants a causa de l'augment de la interferència constructiva. D'aquesta forma és més fàcil mesurar la distància entre els màxims consecutius.

Atès que no utilitzem una llum monocromàtica, la xarxa de difracció també separarà el feix de llum en els seus colors. Així doncs, haurem de prendre com a màxims els punts de llum groga de les línies espectrals que es projectaran a la pantalla.



**Figura 29. Descomposició dels colors de la llum per mitjà d'una xarxa de difracció.**

---

#### Referències bibliogràfiques:

- [8] Solá, J., Hernández, J., & Fernández, R. *Enseñanza de la Física y la Química, Educación Secundaria, Grupo Heureka*: «Medida de la longitud de onda de la luz emitida por un puntero láser».
- [9] GARCÍA, J. *Universidad de Almería, Departamento de Física Aplicada*: «Redes de difracción».



### 2.1.5.2.2. Utilatge

- llanterna o font de llum similar
- filtre groc emprat en el polarímetre casolà
- lupa
- suports de laboratori
- xarxa de difracció
- pantalla blanca
- cinta mètrica
- pinces de laboratori

### 2.1.5.2.3. Procediments

#### a) Muntatge experimental

1. Encendre la font de llum i disposar-la sobre una taula de manera que il·lumini una pantalla blanca.
2. Col·locar el filtre groc a mig camí del feix de llum amb l'ajuda d'un suport i unes pinces.
3. Disposar una lupa per tal que concentri la llum i es projecti un punt en la pantalla blanca.
4. Col·locar una xarxa de difracció de forma perpendicular entre la lupa i la pantalla blanca, subjectant-la també amb un suport de laboratori i unes pinces.



**Figura 30.** Llum projectada sobre la pantalla blanca un cop s'han disposat la lupa i la xarxa de difracció en el seu camí.

b) Preses de mesures i càlcul de la longitud d'ona

1. Observar els dos raigs difractats i mesurar la distància que hi ha entre la zona de color groc de cada raig al punt de llum groga central amb una cinta mètrica. Mesurar també la distància de la xarxa de difracció a la pantalla.
2. Canviar de posició la xarxa de difracció i repetir les mesures diverses vegades.
3. Calcular la longitud d'ona a partir de les diferents mesures aplicant la següent fórmula:

$$\lambda = d \times \frac{\Delta y}{D}$$

$\lambda$ : longitud d'ona

$d$ : separació entre les esclertes

$\Delta y$ : separació entre dos màxims

$D$ : distància entre la xarxa de difracció i la pantalla

Per exemple, les dades obtingudes de la mesura 4 han estat:  $\Delta y = 6,5\text{cm}$ ,  $D = 11\text{cm}$ , i  $d$  ja hem dit anteriorment que queda predeterminat a  $1\text{mm}/999$  línies. Per tant, calculem la longitud d'ona  $\lambda$  de la següent manera, tot aplicant un factor de conversió:

$$\lambda = \frac{1\text{mm}}{999 \text{ esclertes}} \times \frac{6,5\text{cm}}{11\text{cm}} \times \frac{10^6\text{nm}}{1\text{mm}} = 591,5\text{nm}$$

### 2.1.5.3. Resultats obtinguts

La taula següent mostra els resultats dels càlculs de la longitud d'ona de la llum groga a partir de les diferents mesures realitzades. Un cop calculada la mitjana aritmètica, també s'han estudiat els valors de desviació.

Mesura	Longitud d'ona ( $\lambda_i$ )	Desviació ( $d =  \lambda_i - \bar{\lambda} $ )
1	643 nm	53 nm
2	550 nm	40 nm
3	572 nm	18 nm
4	592 nm	2 nm
5	592 nm	2 nm

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum \lambda_i}{N} = \frac{2949}{5} = 590 \text{ nm}$$

$$\bar{d} = \frac{\sum d}{N} = \frac{115}{5} = 23 \text{ nm}$$

Així doncs, prenem com a resultat  $\lambda = (5,9 \pm 0,2) \cdot 10^2 \text{ nm}$ . Tenint en compte que la longitud d'ona real de la llum groga és aproximadament de 589nm, podem calcular l'error absolut i l'error relatiu comès:

$$Ea = 0,2 \cdot 10^2 \text{ nm}$$

$$Er = \frac{0,2}{5,9} \times 100 = 3,4\%$$

### 2.1.5.4. Conclusions de l'experiment

En aquest darrer apartat procedirem a donar resposta de manera breu i directa a les qüestions que havíem plantejat a l'inici de la pràctica:

- Ampliar i posar en pràctica els nostres coneixements teòrics sobre el fenomen de la difracció de la llum.
- Fer un muntatge experimental que ens permeti determinar la longitud d'ona del filtre groc que utilitzem en el nostre polarímetre.
- Comparar el resultat obtingut i calcular-ne l'error respecte la dada real de la longitud d'ona d'una làmpada de sodi.

D'una banda, podem enllaçar els dos primers plantejaments, ja que vam ser capaços de fer un muntatge experimental que ens va permetre determinar la longitud d'ona de qualsevol llum a partir dels fonaments teòrics de la difracció.

A més a més, a simple vista els resultats obtinguts semblen excel·lents: la longitud d'ona de la llum groga determinada va ser de  $(5,9 \pm 0,2) \cdot 10^2$  nm, amb un error relatiu del 3,4%. Val a dir, però, que aquest mètode no proporciona resultats tan exactes com aparenta, ja que la desviació mitjana va ser de 23 nm, de manera que algunes mesures van tenir una desviació força gran.

## 2.1.6. Experiment 4. Determinació experimental de la rotació específica de substàncies òpticament actives mitjançant el nostre polarímetre casolà

### 2.1.6.1. Objectius de l'experiment

Ara que ja tenim construït el nostre polarímetre casolà i que hem comprovat que la llum emesa és l'adient, només falta veure si funciona correctament, és a dir, si és capaç de mesurar la rotació òptica de substàncies òpticament actives amb un marge d'error relativament petit.

Així doncs, per tal de poder fer unes valoracions finals concises sobre la funcionalitat i l'eficàcia del nostre aparell, durem a terme els mateixos experiments que vam realitzar amb el polarímetre de laboratori. D'aquesta forma podrem fer una comparació qualitativa entre tots dos.

És per aquest motiu que en aquesta pràctica ens dedicarem a determinar la rotació específica de les mateixes substàncies que en l'experiment 1.

Establirem com a objectius d'aquesta pràctica els següents punts:

- Determinar la rotació específica de substàncies òpticament actives amb el nostre polarímetre casolà.
- Determinar si les substàncies són levogires o dextrogires.
- Comparar el resultats obtinguts amb els tabulats a la bibliografia i calcular-ne l'error.

### 2.1.6.2. Disseny de l'experiment

Els procediments que cal seguir per determinar la rotació específica de la sacarosa, la glucosa, la lactosa i la fructosa seran els mateixos que vam seguir en l'experiment 1. No obstant, en aquest cas utilitzarem el nostre polarímetre casolà en lloc del polarímetre de laboratori, per suposat.

En conseqüència, resulta més pràctic consultar el protocol presentat en "Experiment 1. Determinació experimental de la rotació específica de substàncies òpticament actives mitjançant un polarímetre de laboratori" (vegem pàgina 23), abans que incloure aquí de nou la mateixa informació.

Òbviament, per mesurar l'angle de rotació òptica de les mostres en el nostre polarímetre casolà, haurem de seguir les instruccions indicades en "Utilització de l'aparell" de l'apartat "Construcció d'un polarímetre casolà" (vegem pàgina 36), i no pas el protocol per al polarímetre de laboratori.

### 2.1.6.3. Resultats obtinguts

Primerament, presentarem una taula que expressa els valors de les dues lectures polarimètriques de l'angle de rotació òptica en forma de mitjana aritmètica de cadascuna de les dissolucions preparades al 10% p/v.

Substància òpticament activa	Angle de rotació $\bar{\alpha}$
Sacarosa	7,5°
Glucosa	5,0°
Lactosa	5,0°
Fructosa	-8,5°

A continuació, mostrarem en una segona taula la rotació específica de cada substància calculat a partir dels resultats anteriors i l'equació definida per la llei de Biot, a més del seu sentit de rotació. Recordem que si les mostres desvien la llum polaritzada en el sentit de les agulles del rellotge són dextrogires(+) en cas contrari, són levogires(-).

Substància òpticament activa	Rotació específica $[\alpha]$	Dextrogira / Levogira
Sacarosa	75,0°	Dextrogira
Glucosa	50,0°	Dextrogira
Lactosa	50,0°	Dextrogira
Fructosa	-92,5°	Levogira

Finalment, aquesta última graella mostra l'error absolut i l'error relatiu comesos respecte a les dades de la rotació específica tabulades a la bibliografia.

Substància òpticament activa	Rotació específica $[\alpha]$	Dada bibliogràfica	Error absolut	Error relatiu
Sacarosa	75,0°	66,4°	8,6°	13%
Glucosa	50,0°	52,7°	2,7°	5%
Lactosa	50,0°	52,3°	2,3°	4%
Fructosa	-85,0°	-92,0°	7,0°	8%
			$\overline{E}_a = 5,2$	$\overline{E}_r = 8\%$

#### 2.1.6.4. Conclusions de l'experiment

Per acabar, en aquest darrer apartat valorarem, d'una manera breu i directa, si vam complir els objectius plantejats:

- Determinar la rotació específica de substàncies òpticament actives amb el nostre polarímetre casolà.
- Determinar si les substàncies són levogires o dextrogires.
- Comparar el resultats obtinguts amb els tabulats a la bibliografia i calcular-ne l'error.

En conclusió, el nostre polarímetre *low cost* és capaç de fer mesures força exactes, ja que en la determinació de la rotació específica de la sacarosa, la glucosa, la lactosa i la fructosa, l'error relatiu mitjà va ser del 8%.

Quant al sentit de desviació de la llum polaritzada d'aquestes substàncies, podem concloure que tant la sacarosa com la glucosa i la lactosa són dextrogires, mentre que la fructosa és levogira.

## **2.1.7. Experiment 5. Determinació experimental de la concentració de sacarosa en begudes refrescants mitjançant el nostre polarímetre casolà**

### **2.1.7.1. Objectius de l'experiment**

Aquesta última tasca pràctica del bloc de polarimetria té com a objectiu determinar la concentració de sacarosa en begudes refrescants, tal i com vam fer en l'experiment 2. En aquest cas, però, utilitzarem el nostre polarímetre casolà per així comparar els resultats obtinguts amb els del polarímetre de laboratori en les valoracions finals.

En resum, aquestes són les qüestions que ens hem plantejat:

- Determinar la concentració de sacarosa en begudes refrescants de diferents marques amb el nostre polarímetre casolà.
- Calcular l'error comès en la determinació a partir de la informació nutricional dels productes.

### **2.1.7.2. Disseny de l'experiment**

Tant l'utilatge com els procediments per determinar la concentració de sacarosa en refrescos seran els mateixos que vam seguir en l'experiment 2, exceptuant que substituïrem el polarímetre de laboratori per la nostra versió casolana.

A fi de no redactar de nou tot aquest disseny experimental i ocupar pàgines inútilment, resulta més pragmàtic consultar el protocol indicat en "Experiment 2. Determinació experimental de la concentració de sacarosa en begudes refrescants mitjançant un polarímetre de laboratori" (vegem pàgina 29).

La lectura de l'angle de rotació de les mostres la farem, però, seguint les instruccions que apareixen en "Utilització de l'aparell" de la secció "Construcció d'un polarímetre casolà" (vegem pàgina 36).

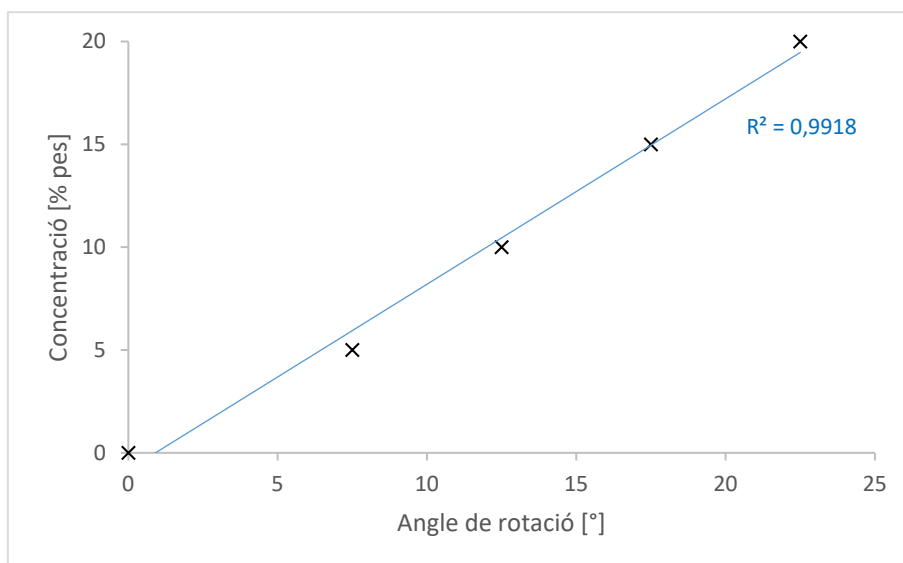


### 2.1.7.3. Resultats obtinguts

La taula següent mostra l'angle de rotació mesurat per a cada dissolució de diferent concentració en el polarímetre casolà. És el resultat de la mitjana aritmètica de dues lectures. Recordem que una sola lectura ja és la mitjana aritmètica dels dos angles que tanquen la franja en què el camp de visió és tot fosc.

Concentració de la dissolució patró en pes	Angle de rotació ( $\bar{\alpha}$ )
0%	0,0°
5%	7,5°
10%	12,5°
15%	17,5°
20%	22,5°

A continuació, també trobem les dades representades en una línia de tendència, on el coeficient de correlació lineal ha estat de 0,9918.



Seguidament presentem en una altra taula els resultats de les lectures polarimètriques dels diferents refrescos triats.

---

<b>Beguda refrescant</b>	<b>Angle de rotació (<math>\bar{\alpha}</math>)</b>
<b>7up</b>	12,5°
<b>Sprite</b>	5,0°
<b>Aquarius llimona</b>	10,0°
<b>Hacendado bebida para deportistas - taronja</b>	7,5°
<b>Burn</b>	15,0°
<b>Don Simón llimonada</b>	7,5°
<b>Nestea</b>	10,0°

Mitjançant la funció *PRONÓSTICO* d'Excel, hem pogut posar aquestes dades en relació amb les obtingudes per a les dissolucions de concentració coneguda i hem estimat el percentatge del contingut de sacarosa per les begudes que vam comprar. Comparant-les amb els valors indicats en les seves respectives etiquetes d'informació nutricional, hem calculat l'error absolut i l'error relatiu comesos en aquesta determinació experimental:

Beguda refrescant	Contingut de sacarosa estimat en 100g de mostra	Contingut de sacarosa real en 100g de mostra	Error absolut	Error relatiu
<b>7up</b>	10,0 g	11,0 g	1,0 g	9%
<b>Sprite</b>	3,7 g	2,1 g	1,6 g	76%
<b>Aquarius llimona</b>	8,2 g	6,3 g	1,9 g	30%
<b>Hacendado bebida para deportistas - taronja</b>	5,0 g	5,3 g	0,3 g	6%
<b>Burn</b>	12,7 g	14,5 g	1,8 g	12%
<b>Don Simón llimonada</b>	5,0 g	5,9 g	0,9 g	15%
<b>Nestea</b>	8,2 g	7,7 g	0,5 g	7%

$$\bar{E}_a = 1,1 \text{ g} \quad \bar{E}_r = 25\%$$

#### 2.1.7.4. Conclusions de l'experiment

Recordarem les qüestions que ens vam plantejar a l'inici de l'experiment per tal d'extreure conclusions concises dels resultats obtinguts:

- Determinar la concentració de sacarosa en begudes refrescants amb el nostre polarímetre casolà.
- Calcular l'error comès en la determinació a partir de la informació nutricional dels productes.

Podem concloure que el nostre polarímetre casolà permet estimar, més que no pas determinar, la concentració de sacarosa en begudes refrescants, ja que vam obtenir un error relatiu del 25%.

Resulta que hi ha productes que tenen una concentració força petita de sacarosa, de manera que qualsevol petit error en la mesura es tradueix en un error relatiu molt elevat.

Aquest ha estat el cas de la beguda de la marca Sprite, que només té un 2,1% de sucre, i per la qual hem obtingut un 76% d'error relatiu. Si obviéssim aquest resultat, l'error relatiu mitjà de l'experiment seria del 16%, 11 punts menys.

## 2.1.8. Valoracions finals

Per donar definitivament per tancat el bloc de polarimetria, volem exposar una comparació quantitativa i qualitativa entre la funcionalitat i l'eficàcia del nostre polarímetre casolà respecte a un polarímetre de laboratori. En les taules següents presentarem una comparació entre l'error comès en els experiments realitzats en aquest bloc.

### DETERMINACIÓ EXPERIMENTAL DE LA ROTACIÓ ESPECÍFICA DE SUBSTÀNCIES ÒPTICAMENT ACTIVES

Aparell	Error relatiu mitjà
Polarímetre de laboratori	3%
Polarímetre casolà	8%

### DETERMINACIÓ EXPERIMENTAL DE LA CONCENTRACIÓ DE SACAROSA EN BEGUDES REFRESCANTS DE DIFERENTS MARQUES

Aparell	Error relatiu mitjà
Polarímetre de laboratori	21%
Polarímetre casolà	25%

A partir d'aquestes dades, no podem negar que a l'hora de determinar la rotació específica de substàncies òpticament actives, el polarímetre de laboratori ha estat més precís. Altrament, el polarímetre de laboratori també proporciona resultats una mica més exactes que el nostre instrument casolà a l'hora de determinar la concentració de sacarosa en refrescos, però val a dir que la nostra versió és més pràctica en aquest tipus d'experiments, ja que en el polarímetre de laboratori no es pot treballar amb mostres amb colorants, cosa que limita molt el camp d'estudi.

Globalment, podem dir que la polarimetria, en termes generals, no és una tècnica molt adient per quantificar el contingut de sucre en begudes, ja que rarament s'hi obté un error relatiu menor del 5%

## 2.2. Refractometria

<b>2.2.1 Raonaments teòrics</b>	62
<b>2.2.2 Experiment 1.</b> Determinació experimental de la concentració total de sucres en begudes refrescants mitjançant un refractòmetre de laboratori	65
<b>2.2.3 Experiment 2.</b> Determinació experimental de la concentració total de sucres en begudes refrescants mitjançant un refractòmetre casolà	69
<b>2.2.4 Valoracions finals</b>	78

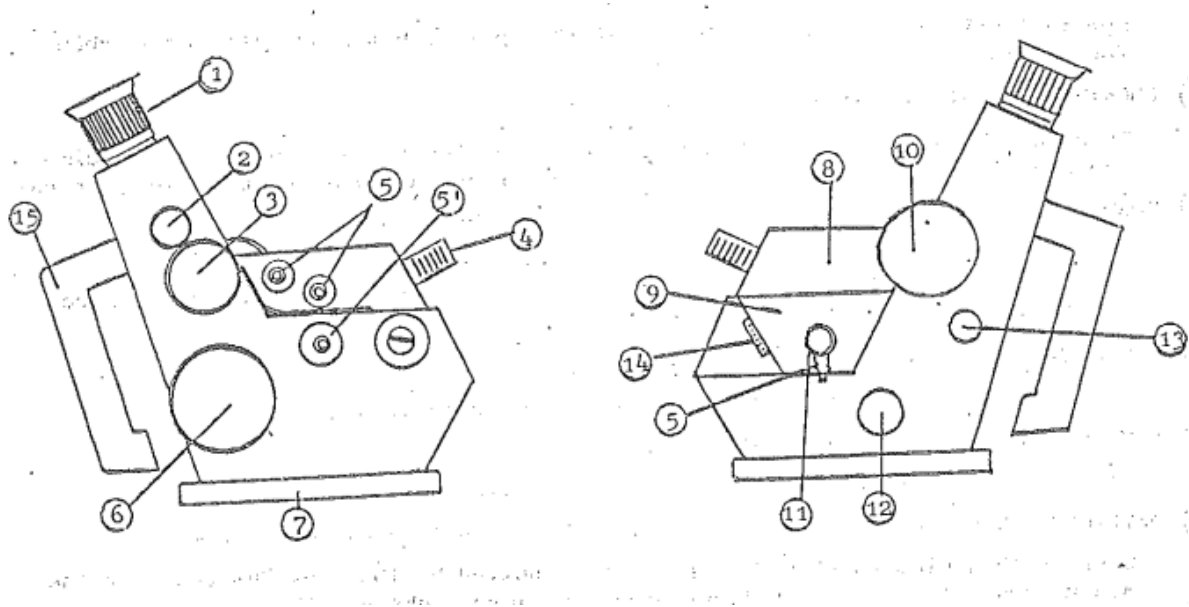
## 2.2.1. Raonaments teòrics

### 2.2.1.1. Descripció de l'equipament de laboratori

Un refractòmetre és l'instrument òptic que s'utilitza per determinar l'índex de refracció de sòlids i líquids translúcids. D'aquesta forma permet identificar una substància, verificar la puresa d'una mostra i analitzar el percentatge d'un solut en una solució, a més d'altres anàlisis qualitius. Els instruments que podem trobar al mercat per a la determinació de l'índex de refracció són molt variats. No obstant, es poden catalogar en tres grans grups, d'acord amb el seu fonament físic:

- Aparells que mesuren directament la desviació dels raigs en passar a través de la substància (per exemple: Goniòmetre).
- Aparells basats en la interferència de la llum (per exemple: interferòmetre de Rialeigh).
- Aparells que mesuren l'angle crític, és a dir, l'angle mínim d'incidència (per exemple: Pulfrich, Abbe).

Nosaltres ens servirem justament d'un refractòmetre d'aquest últim grup, l'"Abbe Shibuya".

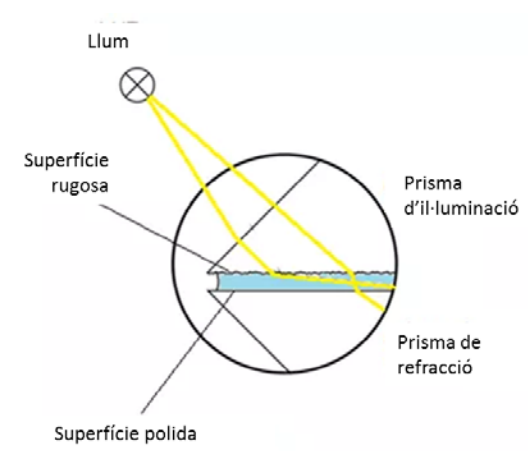


**Figura 31.** Plànol de les diferents parts del refractòmetre emprat en l'experiment 1.

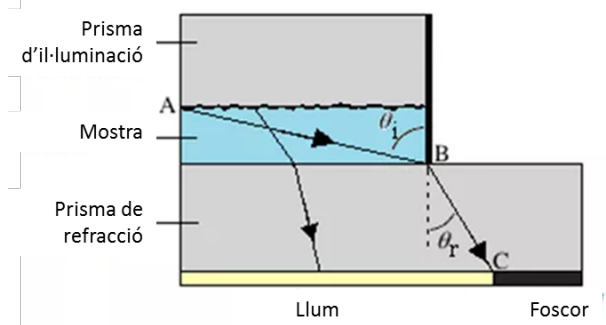
### 2.2.1.1.1. Utilització de l'aparell

Quant a la utilització de l'aparell, el procediment és el següent:

1. Cargolar les bombetes i introduir-les al seu orifici (peça número 13).
2. Netejar bé el prisma principal (peça número 8) i disposar un parell de gotes del líquid problema sobre la seva superfície.
3. Tancar el comandament del prisma suplementari (peça número 10).
4. D'aquesta forma s'obté una finíssima pel·lícula de mostra que queda entre els dos prismes. El prisma superior (el d'il·luminació) té una superfície rugosa, mentre que l'inferior (sobre el qual es deposita la mostra) la té polida. Així, en la mostra entren rajos en totes les direccions possibles.



**Figura 32. Esquema de l'entrada de llum en la mostra.**



**Figura 33. Esquema de dos rajos entrant en la mostra.**

En la il·lustració 33, el raig AB és el que experimenta la major refracció possible, ja que tots els demés entren en el prisma de refracció amb un angle d'incidència menor. Així doncs, a la dreta del punt a què arriba el raig BC hi haurà foscor i a l'esquerra hi haurà llum.

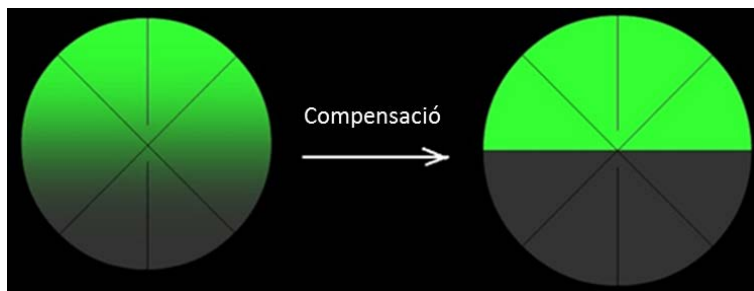
S'observa que el raig AB és pràcticament rasant, ja que no l'espessor de la mostra és molt petita (a la imatge està molt amplificada). Per tant, el raig BC s'està refractant amb l'angle crític.

5. Mirar per l'ocular (peça número 1).
6. Girar el comandament de dispersió (peça número 3) per definir la línia de demarcació entre la brillantor i la foscor del camp de visió.

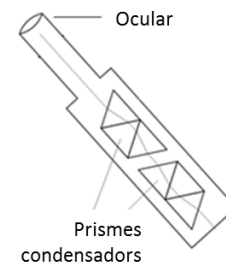
En la pràctica, en els refractòmetres Abbe que utilitzen il·luminació de llum blanca, és a dir, llum policromàtica, la línia de separació no se sol veure nítidament, sinó difuminada, i fins i tot a vegades s'observen colors. Això és degut a que una mostra no té un índex de refracció fixe, sinó que en té un per a cada radiació que li arriba, segons la longitud d'ona. Per tal d'evitar aquesta dispersió, s'hi col·loquen uns prismes compensadors que, en ser moguts lleugerament per mitjà del comandament



de dispersió, permeten mesurar un índex de refracció igual al que s'obtindria si la llum fos monocromàtica.



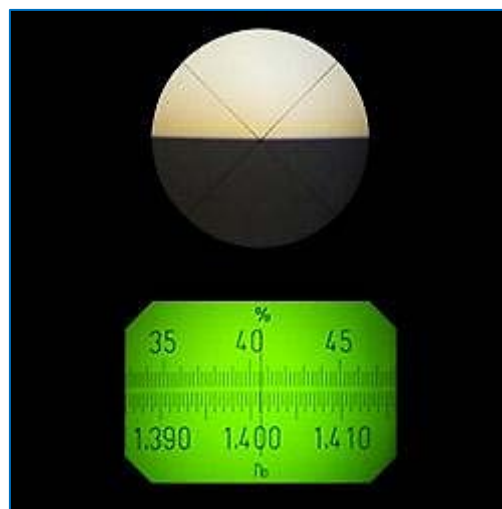
**Figura 34. Compensació de la dispersió provocada per la llum blanca policromàtica.**



**Figura 35. Esquema de la disposició dels prismes condensadors.**

7. Girar el comandament de mesura (peça número 6) per portar la línia de demarcació de brillantor i foscor al centre del feix de llum del camp de visió.

En seguir aquests procediments, estem buscant l'angle crític. Un cop hem aconseguit centrar la línia, l'índex de refracció és el valor que marca l'escala. En el mateix camp de visió es pot llegir una altra escala el percentatge total de sucres.



**Figura 36. Exemple en què s'ha mesurat una concentració del 41% i un índex de refracció de 1,402.**

#### Referències bibliogràfiques:

- [10] *Triplénlace*. «Refractometría II: Cómo funciona un refractómetro Abbe».

## 2.2.2. Experiment 1. Determinació experimental de la concentració total de sucres en begudes refrescants mitjançant un refractòmetre de laboratori

### 2.2.2.1. Objectius de la pràctica

Aquest segon apartat del treball de recerca té la mateixa finalitat que l'anterior: determinar la concentració de sucre de diversos refrescos. No obstant, la metodologia serà totalment diferent, ja que ens servirem dels principis de la refracció.

Aquesta primera pràctica del bloc de refractometria farem aquesta determinació amb un refractòmetre de laboratori. Més endavant, quan haguem après a fer-lo anar i, conseqüentment, haguem entès correctament el seu principi de funcionament, estarem preparats per fer un muntatge experimental casolà que ens permetrà aconseguir aquestes dades.

Un detall important és que la glucosa, la fructosa i la sacarosa, edulcorants principals de la majoria de les begudes refrescants del mercat, tenen índexs de refracció pràcticament idèntics, així que no caldrà fer cap tipus de distinció a l'hora de triar els productes que volem estudiar, donat que podrem determinar la concentració total de sucres.

En poques paraules, aquests són els objectius de l'experiment 1 del bloc de refractometria:

- Aprendre a treballar amb un refractòmetre de laboratori.
- Determinar la concentració total de sucres en begudes refrescants de diferents marques amb un refractòmetre de laboratori.
- Calcular l'error comès en la determinació a partir dels valors tabulats a la bibliografia.

### 2.2.2.2. Disseny de l'experiment

#### 2.2.2.2.1. Descripció de l'experiment

Aquest mètode per determinar el contingut de sucre d'una dissolució es basa en que com més gran és la concentració de solut, més gran és l'índex de refracció de la dissolució aquosa. A més a més, l'índex de refracció és quasi el mateix si es tracta de sacarosa, glucosa o fructosa (vegeu la taula que es presenta a continuació), de manera que si en un refresc hi ha una barreja d'aquestes tres substàncies, el que trobarem és el percentatge total de sucres.

Concentració de sucre en pes	Índex de refracció de dissolucions aquoses a 20 °C		
	Sacarosa	Fructosa	Glucosa
0%	1,3330	1,3330	1,3330
10%	1,3478	1,3476	1,3477
20%	1,3639	1,3634	1,3635
30%	1,3812	1,3802	1,3805

Així doncs, simplement seleccionarem begudes de diferents marques i mirarem en un refractòmetre de laboratori el seu contingut total de sucres.

#### 2.2.2.2.2. Utilitatge

- Polarímetre de laboratori
- Begudes refrescants de diferents marques

En aquest experiment nosaltres hem triat les següents marques de begudes: 7up, Sprite, Aquarius llimona, Hacendado bebida para deportistas taronja, Burn, Nestea, llimonada Don Simón, Hacendado tònica, Coca-Cola, Coca-Cola Zero.

#### 2.2.2.2.3. Procediments

La lectura del percentatge total de sucres en el refractòmetre "Abbe Shibuya" és directa. Només cal seguir els passos a seguir que ja van ser explicats detalladament en l'apartat "Utilització de l'aparell" dels raonaments teòrics.

### 2.2.2.3. Resultats obtinguts

La taula següent mostra per a cada beguda la concentració total de sucres estimada. També hi apareix la dada real que trobem indicada en la informació nutricional dels productes, a partir de la qual hem calculat els errors absolut i relatiu comesos en cada determinació.

Beguda refrescant	Contingut de sucres en 100 g de mostra estimat	Contingut de sucres en 100 g de mostra real	Error absolut	Error relatiu
Coca-Cola Zero	0 g	0 g	0 g	0%
Sprite	2,2 g	2,1 g	0,1 g	5%
Aquarius llimona	6,0 g	6,3 g	0,3 g	5%
Hacendado bebida para deportistas taronja	5,0 g	5,3 g	0,3 g	6%
Nestea	7,0 g	7,7 g	0,7 g	9%
Hacendado tònica	7,5 g	6,0 g	1,5 g	25%
Coca-Cola	9,0 g	10,0 g	1,0 g	10%
Hacendado bebida energètica	5,0 g	11,0 g	6,0 g	55%
7up	10,0 g	11,0 g	1,0 g	9%
Burn	14,0 g	14,5 g	0,5 g	3%
			$\bar{E}_a = 1,1$	$\bar{E}_r = 14\%$

#### 2.2.2.4. Conclusions de l'experiment

És convenient fer memòria dels objectius que ens vam proposar complir en aquesta pràctica per extreure'n conclusions:

- Aprendre a treballar amb un refractòmetre de laboratori.
- Determinar la concentració total de sucres en begudes refrescants de diferents marques amb un refractòmetre de laboratori.
- Calcular l'error comès en la determinació a partir dels valors tabulats a la bibliografia.

Sorprenentment, un refractòmetre és molt fàcil de fer anar, en comparació amb un polarímetre.

En relació a la determinació de la concentració total de sucres en les begudes, els resultats no van ser esplèndids, però tampoc dolents: l'error relatiu mitjà va ser del 14%.

No obstant, podem fer una petita observació respecte a aquesta última dada, que seria, curiosament, és força inferior si obviéssim els resultats obtinguts per a les dues begudes de la marca Hacendado, per a les quals hem obtingut un error relatiu del 25,0% i del 54,54%, quan per a tots els altres productes aquesta xifra ha estat inferior al 10%.

## 2.2.3. Experiment 2. Determinació de la concentració de sucres total en begudes refrescants mitjançant un refractòmetre casolà

### 2.2.3.1. Objectius de l'experiment

Ara que ja sabem com funciona un refractòmetre i hem acabat d'entendre els principis teòrics de la refracció, és el moment de dissenyar i elaborar nosaltres mateixos la versió casolana de l'aparell.

Aquest protocol inclou el material necessari, esquemes visuals i els procediments que s'han de seguir per muntar-lo. Si aconseguim que funcioni, podrem calcular la concentració total de sucres en diferents refrescos a partir d'ell.

Resumint, aquests són els objectius d'aquesta part experimental:

- Posar en pràctica els nostres coneixements teòrics sobre la refractometria.
- Construir un refractòmetre casolà amb un baix pressupost i materials del laboratori de l'institut.
- Determinar la concentració total de sucres en begudes refrescants de diferents marques amb el nostre refractòmetre casolà.
- Calcular l'error comès en la determinació a partir de les dades de la informació nutricional dels productes.

### 2.2.3.2. Disseny de l'experiment

#### 2.2.3.2.1. Descripció de l'experiment

Per construir un refractòmetre casolà, en primer lloc utilitzarem alguns portaobjectes per muntar un prisma de refracció. Un raig d'un punter làser, que emet una llum monocromàtica, travessarà la dissolució a estudiar que el prisma contindrà. El punter estarà subjectat per un suport i s'haurà de moure el mínim possible fins que s'hagin acabat les mesures. A la paret o la pantalla blanca on es projectarà la llum hi posarem paper quadriculat i hi marcarem el punt on incideix el raig refractat.

Així doncs, començarem marcant el punt d'incidència del raig quan el prisma conté aigua i diverses dissolucions patró de sucre, per així tenir unes referències i poder graduar el paper quadriculat. Un cop fet això, podrem passar a determinar la concentració de sucre de les begudes triades a partir de l'altura desviada del raig respecte al punt de l'aigua.

Finalment, calcularem l'error comès en la determinació a partir dels valors indicats a la informació nutricional de cada producte.

#### 2.2.3.2.2. Utilatge i material

- 5 portaobjectes
- pistola de silicona
- transportador d'angles
- pantalla blanca
- paper quadriculat
- regle

- punter làser
- suport de laboratori
- pinces
- aigua destil·lada
- sucre
- begudes refrescants de diferents marques

Per tal de poder comparar els resultats que obtinguem amb els del polarímetre de laboratori, hem triat les mateixes marques de begudes: 7up, Sprite, Aquarius llimona, Hacendado bebida para deportistas taronja, Burn, Nestea, llimonada Don Simón, Hacendado tónica, Coca-Cola, Coca-Cola Zero.

### 2.2.3.2.3. Procediments

#### a) Preparació de les dissolucions patró

En l'experiment 2 del bloc 1 de polarimetria, ja s'expliquen els procediments per preparar dissolucions patró al 5%, 10%, 15% i 20% (vegem pàgines 30-31).

#### b) Construcció d'un prisma de refracció

Per construir un prisma de refracció només cal encolar amb silicona cinc portaobjectes de microscopi de manera que una cara i els dos laterals siguin perpendiculars a la base i l'altra cara formi un angle d'uns 18°.

#### c) Muntatge experimental del refractòmetre

1. Subjectar el punter làser en un suport de laboratori amb l'ajuda d'unes pinces.
2. Seguidament, col·locar el prisma de refracció ben a prop de manera que el raig entri per la cara vertical i surti per la cara inclinada. Es pot marcar a la taula el contorn de la base del prisma amb un retolador permanent per tal de poder-lo treure i tornar a posar sempre igual.
3. A almenys 5 metres del prisma, posar-hi una pantalla blanca (una paret o una capsa) i enganxar-hi el paper quadriculat.

#### d) Utilització de l'aparell

1. Encendre el punter làser i no tocar-lo més en el transcurs de l'experiment. Si s'escau, es pot utilitzar cinta adhesiva per deixar el botó interruptor pres.
2. Abocar la dissolució o la beguda a estudiar a l'interior del prisma. És important netejar-lo bé prèviament amb aigua destil·lada i amb petits volums de la mateixa mostra.
3. En el paper quadriculat de la pantalla blanca, marcar el punt d'incidència del raig del punter làser quan el prisma està ple d'aigua, amb les diferents dissolucions de concentració coneguda i finalment amb els líquids problema.

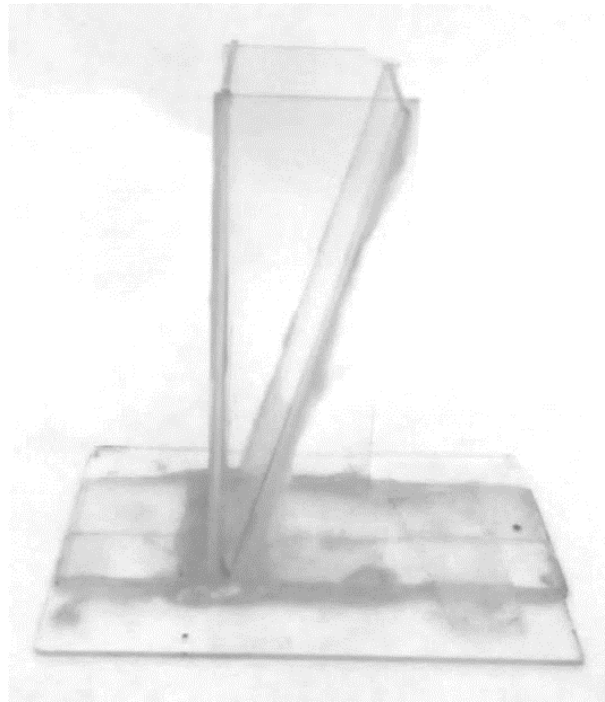


Figura 37. Prisma de refracció construït a base de portaobjectes

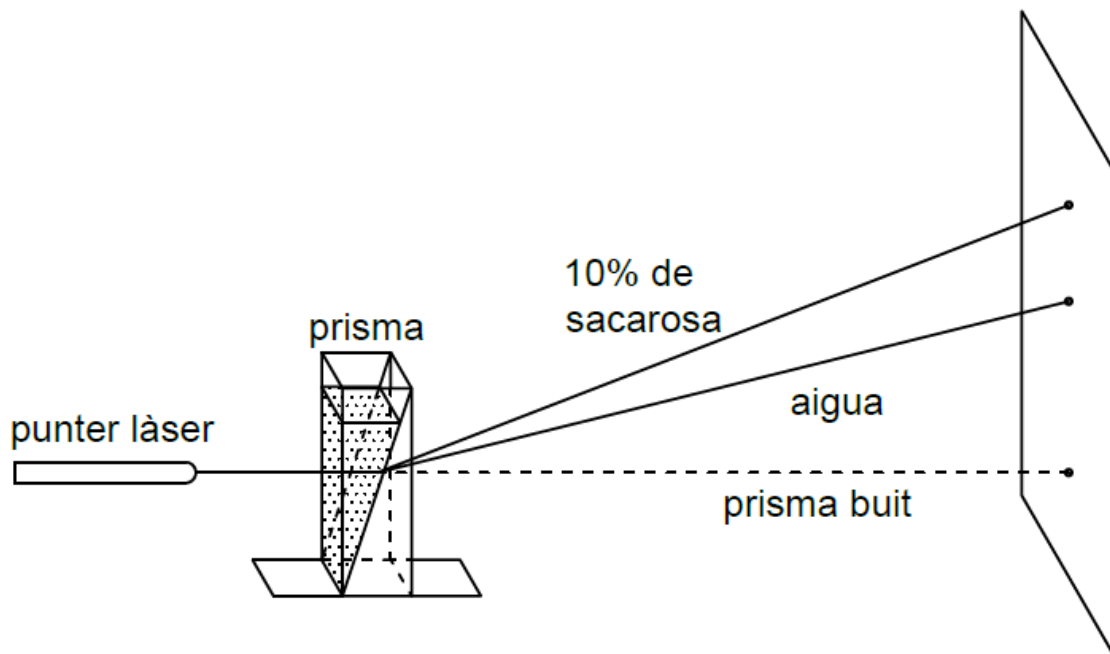


Figura 38. Esquema del muntatge experimental d'un refractòmetre casolà.





Figura 39. Punter làser subjectat per una pinça en un suport de laboratori incidint en el prisma de refracció.

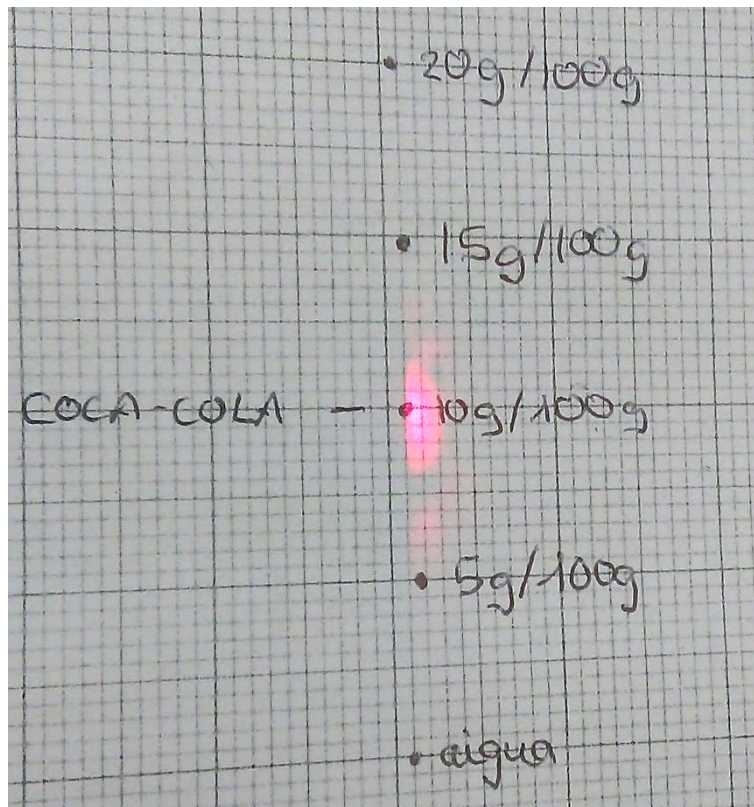


Figura 40. Raig refractat per la mostra de Coca-Cola incidint justament al 10%.

e) Determinació de la concentració de sucres total de les begudes

1. Mesurar l'altura desviada del punt d'incidència del raig refractat per les dissolucions de concentració coneguda respecte al punt de l'aigua amb un regle i anotar les dades disposar les dades en una taula d'un full de càlcul Excel.
2. Anàlogament, cal mesurar l'altura desviada del raig refractat per les begudes seleccionades i fer una altra taula amb aquestes dades.
3. Afegir a la taula de les begudes una nova columna per a les concentracions en tant per pes.
4. Seleccionar la casella corresponent al producte pel qual volem calcular la concentració total de sucres i activar la funció PRONOSTICO d'Excel

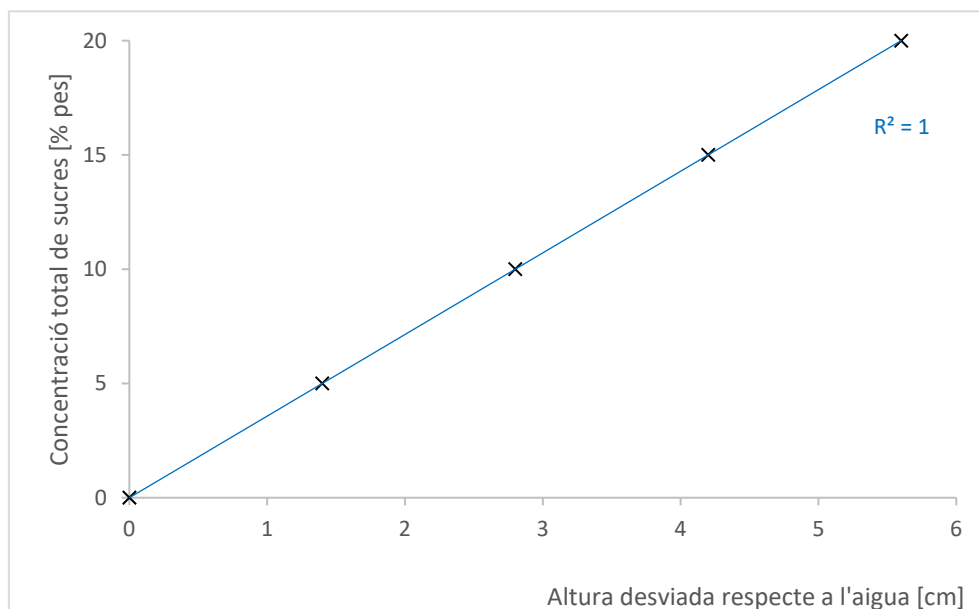
Com podem veure, el tractament de les dades al full de càlcul Excel és el mateix al que vam desenvolupar en l'experiment 2 del bloc de polarimetria. Allà hi podem trobar l'explicació més detallada amb captures de pantalla d'arxius Excel (vegem pàgina 32).

### 2.2.3.3. Resultats obtinguts

La graella següent mostra l'altura desviada del punt d'incidència del raig refractat respecte el punt de l'aigua al paper quadriculat per a cada dissolució de sacarosa patró.

Dissolució patró	Altura desviada respecte al punt de l'aigua
5%	1,4 cm
10%	2,8 cm
15%	4,2 cm
20%	5,6 cm

Tot seguit, també veiem representada en un gràfic la línia de tendència corresponent, en què el coeficient de correlació ha resultat ser 1.



En aquesta taula trobem indicada l'altura desviada respecte al punt de l'aigua del raig refractat per cada refresc.

<b>Beguda refrescant</b>	<b>Altura desviada respecte a l'aigua</b>
<b>Coca-Cola Zero</b>	0,0 cm
<b>Sprite</b>	0,6 cm
<b>Aquarius llimona</b>	1,4 cm
<b>Hacendado bebida para deportistas - taronja</b>	1,4 cm
<b>Nestea</b>	2,1 cm
<b>Hacendado tònica</b>	2,3 cm
<b>Coca-Cola</b>	2,8 cm
<b>Hacendado bebida energètica</b>	3,0 cm
<b>7up</b>	3,0 cm
<b>Burn</b>	4,2 cm

Aquesta última graella mostra el percentatge del contingut total de sucres de les begudes, calculat mitjançant la funció PRONOSTICO d'Excel, que posa en relació la desviació del raig respecte el punt de l'aigua de les dades dissolucions de concentració coneguda i les begudes. Comparant aquestes dades amb els valors indicats en les seves respectives etiquetes d'informació nutricional, hem calculat l'error comès en aquesta determinació experimental i l'hem afegit a la taula.

Beguda refrescant	Contingut de sucres en 100 g de mostra estimat	Contingut de sucres en 100 g de mostra real	Error absolut	Error relatiu
<b>Coca-Cola Zero</b>	0,0 g	0,0 g	0,0 g	0%
<b>Sprite</b>	2,1 g	2,1 g	0,0 g	0%
<b>Aquarius llimona</b>	5,0 g	6,3 g	1,3 g	21%
<b>Bebida para deportistas Hacendado - taronja</b>	5,0 g	5,3 g	0,3 g	6%
<b>Nestea</b>	7,5 g	7,7 g	0,2 g	3%
<b>Hacendado tònica</b>	8,2 g	6,0 g	2,2 g	37%
<b>Coca-Cola</b>	10,0 g	10,0 g	0,0 g	0%
<b>Hacendado bebida energètica</b>	10,7 g	11,0 g	0,3 g	3%
<b>7up</b>	10,7 g	11,0 g	0,3 g	3%
<b>Burn</b>	15,0 g	14,5 g	0,5 g	3%
			$\overline{E}_a = 0,5$	$\overline{E}_r = 8\%$

### 2.2.3.4. Conclusions de l'experiment

Si recordem els objectius d'aquest experiment:

- Posar en pràctica els nostres coneixements teòrics sobre la refractometria.
- Construir un refractòmetre casolà amb un baix pressupost i materials del laboratori de l'institut.
- Determinar la concentració total de sucres en begudes refrescants de diferents marques amb el nostre refractòmetre casolà.
- Calcular l'error comès en la determinació a partir de les dades de la informació nutricional dels productes.

Podem concloure que, un cop estudiat els principis del fenomen de la refracció i treballat amb un refractòmetre de laboratori, vam poder dissenyar i elaborar un muntatge *low cost* basat en el fenomen de la refracció força eficaç, ja que a l'hora de determinar la concentració total de sucres de diferents begudes ensucrades l'error relatiu mitjà va ser de només el 8%.

## 2.2.4. Valoracions finals

Tal i com vam fer en el bloc 1, abans de donar per finalitzada la secció de refractometria, és important fer una breu comparació quantitativa i qualitativa de la funcionalitat i eficàcia del nostre refractòmetre casolà respecte a la del refractòmetre de laboratori.

Per aquesta raó presentem en la taula següent una comparativa entre els dos aparells de l'error relatiu comès en la determinació de la concentració total de sucres en begudes ensucrades de diferents marques.

---

### DETERMINACIÓ EXPERIMENTAL DE LA CONCENTRACIÓ TOTAL DE SUCRE EN BEGUDES REFRESCANTS DE DIFERENTS MARQUES

Aparell	Error relatiu mitjà
Refractòmetre de laboratori	14%
Refractòmetre casolà	8%

En conclusió, a partir d'aquestes dades podem dir que, sorprenentment, el nostre muntatge experimental va donar resultats més exactes que el refractòmetre de laboratori. Val a dir, però, que l'aparell de laboratori que ens van cedir era força antic, i segurament un refractòmetre nou proporcionaria més exactitud que la nostra versió *low cost*.

Tot i així, estem orgullosos que un muntatge tan summament senzill i a l'abast de tot estudiant aporti tan bons resultats.

## **3. Conclusions**



## 3.1. Conclusions

A l'hora d'elaborar les conclusions finals, cal recordar breument els objectius d'aquest treball de recerca: ens havíem proposat determinar la rotació específica de substàncies òpticament actives mitjançant un polarímetre, així com les concentracions de sucre de begudes refrescants també amb un polarímetre i un refractòmetre de laboratori. Aquests objectius van ser ampliat després afrontant el repte de fabricar els nostres propis equips amb un pressupost *low cost* per realitzar amb ells les mateixes pràctiques experimentals i comparar els resultats d'uns i altres amb la informació nutricional ressenyada als envasos del fabricant.

Doncs bé, quant al **bloc de polarimetria**, en primer lloc vaig procedir a determinar la rotació específica de diversos diversos sucres que sovint presents als refrescos: la sacarosa, la glucosa, la fructosa i la lactosa. Per mostrar resultats, que apareixen més detallats a la taules annexes, el meu polarímetre havia comès un 8% d'error relatiu, mentre que el polarímetre de laboratori havia proporcionat uns resultat excel·lents, amb només un 3% d'error relatiu.

Substància òpticament activa	Rotació específica estimada		Rotació específica
	Polarímetre laboratori	Polarímetre <i>low cost</i>	
<b>Sacarosa</b>	68,5°	75,0°	66,4°
<b>Glucosa</b>	50,0°	50,0°	52,7°
<b>Fructosa</b>	50,0°	50,0°	52,3°
<b>Lactosa</b>	-92,5°	-85,0°	-92,0°
<b>Error relatiu</b>	<b>3%</b>	<b>8%</b>	

Pel que fa a la determinació del contingut de sacarosa en diferents begudes, el polarímetre del laboratori, amb estructura de tub opac i bases transparents, va reportar una limitació inicial ja que només permetia estudiar els refrescos totalment incoloros, que són minoria al mercat. És a dir, només vaig poder parametritzar dos dels set refrescos de la mostra seleccionada: 7up i Sprite. En la resta de begudes el camp de visió era pràcticament nul i no es va poder fer cap determinació. Però va ser treballant i fent pràctiques amb aquest que vaig poder experimentar i dissenyar el meu polarímetre *low cost* amb una estructura de vas translúcid per poder avançar en la recerca. En definitiva, el polarímetre *low cost* em va permetre treballar amb mostres amb colorants i realitzar unes pràctiques experimentals que només amb el polarímetre del laboratori s'havien quedat bloquejades.

Com a conclusió, el meu equip *low cost* havia comès un 25% d'error relatiu, en tant que a l'equip de laboratori havia estat del 21% (tenint en compte només els dos valors que m'havia proporcionat). Aquesta disparitat cal atribuir-la al fet que hi ha productes que tenen una concentració molt petita de sacarosa, de manera que qualsevol petit error absolut en la mesura repercuteix en un gran error relatiu. Per cas, Sprite només conté un 2,1 g de sucre i l'error relatiu del meu polarímetre *low cost* va resultar del 76%. Prescindint d'aquest resultat, l'error relatiu global seria del 16%.

Quant al **bloc de refractometria**, vaig repetir uns procediments similars als de la fase de polarimetria amb un refractòmetre de laboratori, vaig construir el meu refractòmetre *low cost*, vaig executar les pràctiques experimentals i vaig comparar resultats. El resum dels resultats consta a la taula següent, però la conclusió més sorprenent que cal ressaltar és que amb el refractòmetre de laboratori vaig tenir un error relatiu mitjà del 14% en la determinació de la concentració de sucre en relació a les dades del fabricant, i amb el meu refractòmetre *low cost* l'error va ser 8%. Els resultats de l'equip *low cost* eren més exactes que els de l'equip de laboratori! L'explicació és simple: el refractòmetre del laboratori era un equip molt vell i segurament, si hagués estat substituït per un nou, els seus resultats haurien estat molt més exactes que els del meu. Però això no desvirtua el mèrit de la recerca experimental realitzada, que va ser haver aconseguir-ho fer amb el meu equip casolà.

Begudes refrescants ensucrades analitzades	Pràctiques experimentals. Contingut de sucre estimat (grams de sucre per cada 100 grams de mostra)				Fitxa nutricional. Contingut real (g/100 g)
	Polarímetre laboratori	Polarímetre <i>low cost</i>	Refractòmetre laboratori	Refractòmetre <i>low cost</i>	
<b>Coca-Cola Zero</b>	(*)	(*)	0,0 g	0,0 g	0,0 g
<b>Sprite</b>	1,8 g	3,7 g	2,2 g	2,1 g	2,1 g
<b>Aquarius llimona</b>	(**)	8,2 g	6,0 g	5,0 g	6,3 g
<b>Hacendado deportistes</b>	(**)	5,0 g	5,0 g	5,0 g	5,3 g
<b>Nestea</b>	(**)	8,2 g	7,0 g	7,5 g	7,7 g
<b>Hacendado tònica</b>	(*)	(*)	7,5 g	8,2 g	6,0 g
<b>Coca-Cola</b>	(*)	(*)	9,0 g	10,0 g	10,0 g
<b>Hacendado energètica</b>	(*)	(*)	5,0 g	10,7 g	11,0 g
<b>7up</b>	8,0 g	10,0 g	10,0 g	10,7 g	11,0 g
<b>Burn</b>	-	12,7 g	14,0 g	15,0 g	14,5 g
<b>Error relatiu</b>	<b>21%</b>	<b>25%</b>	<b>14%</b>	<b>8%</b>	

(\*) No procedia fer la mesura polarimètrica, atès que la mostra contenia glucosa i/o fructosa.

(\*\*) El polarímetre de laboratori no permetia fer la mesura perquè la mostra contenia colorants.

El "duel experimental" entre els equips disponibles en el laboratori i la meua tecnologia *low cost* d'estudiant de batxillerat amb menys de 50 euros de pressupost, va resultar apassionant. Allò que en principi es perfilava com una monòtona pràctica de recollida de dades va esdevenir per a mi un recurs pedagògic summament atractiu que, en haver de fabricar els meus propis equips, em va permetre descobrir ni més ni menys que la cara més dolça de la llum. La química ha resultat ser un món de recerca interminable que no pot acabar aquí. En realitat, no ha fet més que començar. Aquesta és, per a mi, la gran conclusió final d'aquest treball.

## 4. Referències bibliogràfiques

- [1] TRIPLER, P., & MOSCA, G. (2011). *Física para la ciencia y la tecnología. Electricidad y magnetismo, luz* (Vol. 2). Barcelona: Editorial Reverté.
- [2] MERCADÉ, J., SERRA, S., & ARMENGOL, M. (2009). *FÍSICA 2 BATXILLERAT*. Madrid: McGraw-Hill Mediterrània.
- [3] *Grupo de Investigación Laboratorios Virtuales en Ciencia y Tecnología*. «Tutorial de Óptica Geométrica: ESPEJOS». Consultat el novembre de 2016. Disponible a: <http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/39/>
- [4] OLIVIER DARRIGOL - *A History of Optics from Greek Antiquity to the Nineteenth Century pdf* - Oxford - 1st Edition, Kindle Edition
- [5] *OpenCourseWare Universidad de Sevilla*. «Química orgánica I, Tema 4, Lección 5: Estereoquímica I». Consultat el juliol de 2016. Disponible a: [http://ocwus.us.es/quimica-organica/quimica-organica-i/temas/4\\_estereoquimica/leccion\\_5\\_nuevo/](http://ocwus.us.es/quimica-organica/quimica-organica-i/temas/4_estereoquimica/leccion_5_nuevo/)
- [6] *Wikipedia Commons*. «Quiralitat (química)». Consultat el juliol de 2016. Disponible a: [https://ca.wikipedia.org/wiki/Quiralitat\\_\(qu%C3%ADmica\)](https://ca.wikipedia.org/wiki/Quiralitat_(qu%C3%ADmica))
- [7] *Wikipedia Commons*. «Specific rotation». Consultat el juliol de 2016. Disponible a: [https://en.wikipedia.org/wiki/Specific\\_rotation](https://en.wikipedia.org/wiki/Specific_rotation)
- [8] Solá, J., Hernández, J., & Fernández, R. *Enseñanza de la Física y la Química, Educación Secundaria, Grupo Heurema*. «Medida de la longitud de onda de la luz emitida por un puntero láser». Consultat l'octubre de 2016. Disponible a: <http://www.heurema.com/PF12.htm>
- [9] GARCÍA, J. *Universidad de Almería, Departamento de Física Aplicada*. «Redes de difracción». Consultat el novembre de 2016. Disponible a: [www.ual.es/~mjgarcia/redesdifraccion.pdf](http://www.ual.es/~mjgarcia/redesdifraccion.pdf)
- [10] *Triplenlace*. «Refractometría II: Cómo funciona un refractómetro Abbe». Consultat el novembre de 2016. Disponible a: <http://triplenlace.com/2012/11/13/refraccion-ii-como-funciona-un-refractometro-de-abbe/>

## 5. Galeria d'imatges

**Figura 1:** *HolaDoctor*. «Bebidas azucaradas: la dulzura que mata». Recuperat de: <http://holadoctor.com/es/%C3%A1lbum-de-fotos/bebidas-azucaradas-la-dulzura-que-mata>

**Figura 2:** *The Mysearch Website*. «Double Slit Experiment». Recuperat de: <http://www.mysearch.org.uk/website1/html/546.Double-Slit.html>

**Figura 3:** CAVALLBERNAT. *Wikipèdia Commons*. «Ona electromagnètica». Recuperat de: [https://ca.wikipedia.org/wiki/Fitxer:Onde\\_%C3%A9lectromagn%C3%A9tique\\_ca.png](https://ca.wikipedia.org/wiki/Fitxer:Onde_%C3%A9lectromagn%C3%A9tique_ca.png)

**Figura 4:** ARBIOL, R. *Revista Catalana de Geografia*. «Espectre electromagnètic». Recuperat de: <http://www.rcg.cat/articles.php?id=162&comments>

**Figura 5:** NORDMANN, A. *Wikipedia Commons*. «Refraction on an aperture – Huygens-Fresnel principle». Recuperat de: [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Refraction\\_on\\_an\\_aperture\\_-\\_Huygens-Fresnel\\_principle.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Refraction_on_an_aperture_-_Huygens-Fresnel_principle.svg)

**Figura 6:** *Mini Physics*. «Refraction of light». Recuperat de: <https://www.miniphysics.com/refraction-of-light.html>

**Figura 7:** TRIPLER, P., & MOSCA, G. (2011). *Física para la ciencia y la tecnología. Electricidad y magnetismo, luz* (Vol. 2). Barcelona: Editorial Reverté.

**Figures 8 i 9:** *OpenCourseWare Universidad de Sevilla*. «Química orgánica I, Tema 4, Lección 5: Estereoquímica I». Recuperat de: [http://ocwus.us.es/quimica-organica/quimica-organica-i/temas/4\\_estereoquimica/leccion\\_5\\_nuevo/](http://ocwus.us.es/quimica-organica/quimica-organica-i/temas/4_estereoquimica/leccion_5_nuevo/)

**Figures 13, 14, 15 i 16:** *MolView*. Recuperat de: <http://molview.org/>

**Figures 17 i 19:** Elaboració pròpia a partir d'arxius recuperats del banc d'imatges: <http://www.servier.com/Powerpoint-image-bank>

**Figures 27, 28 i 29:** *Socratic*. «Whis is diffraction grating more accurate than double slits to wavelength of light?». Recuperat de: <https://socratic.org/questions/why-is-diffraction-grating-more-accurate-than-double-slits-to-measure-the-wavele>

**Figures 31, 32, 33, 34 i 35:** *Triplenlace*. «Refractometría II: Cómo funciona un refractómetro Abbe». Recuperat de: <http://tripenlace.com/2012/11/13/refraccion-ii-como-funciona-un-refractometro-de-abbe/>