

# Polarització de la llum

Ben Thomas, Jan Tena

22 de gener de 2026

## Resum

En aquesta pràctica s'ha estudiat el fenomen de la polarització de la llum, una propietat derivada de la seva naturalesa d'ona electromagnètica transversal. Mitjançant l'ús de polaritzadors lineals i làmines de quart d'ona, s'han generat i analitzat tres estats de polarització: lineal, el·líptic i circular. Per a cada cas, s'ha mesurat la intensitat de la llum transmesa en funció de l'orientació relativa dels elements òptics, seguint les prediccions de la llei de Malus.

Els resultats obtinguts han confirmat la validesa de les prediccions teòriques. En la polarització lineal, s'ha verificat experimentalment la llei de Malus, obtenint una excel·lent concordança amb els models. Per a la polarització el·líptica, l'excentricitat mesurada experimentalment ha coincidit amb els valors teòrics, mentre que en la polarització circular s'ha observat que les variacions de la intensitat depenen de la longitud d'ona de la llum, evidenciant la influència de les propietats espectrals de la làmina de quart d'ona.

Aquest estudi ha permès verificar les propietats de la polarització i analitzar l'efecte dels materials birefringents en la modificació de l'estat de polarització. A més, s'ha aplicat aquest coneixement per entendre el funcionament de les ulleres 3D, demostrant com aquestes separen imatges polaritzades per generar l'efecte tridimensional. Els resultats obtinguts consoliden els conceptes teòrics sobre la polarització i la seva anàlisi experimental, aportant una comprensió més profunda de la llum polaritzada i les seves aplicacions tecnològiques.

## 1 Introducció

En aquesta pràctica, s'han dut a terme diverses mesures experimentals per analitzar els diferents estats de polarització de la llum: lineal, el·líptic i circular. El procés d'obtenció de dades s'ha basat en la generació d'aquests estats utilitzant una font de llum LED, polaritzadors lineals i una làmina de quart d'ona. Les intensitats de llum transmesa s'han mesurat amb un fotodetector connectat a un multímetre, la resposta del qual és proporcional a la intensitat lumínica incident.

Per a cada estat de polarització, s'ha variat l'orientació dels elements òptics en intervals regulars (5 graus), registrant la intensitat lumínica transmesa en funció de l'angle. En el cas de la polarització lineal, s'ha utilitzat la llei de Malus per verificar la coherència dels resultats amb el model teòric. Per a la polarització el·líptica, s'han determinat els semieixos de l'el·ipse mitjançant l'ajust de la intensitat a un model teòric. Finalment, en la polarització circular, s'ha verificat la constància de la intensitat independentment de l'orientació del polaritzador, a més de comparar els efectes per a diferents longituds d'ona (llum verda i vermella).

Finalment, utilitzarem les ulleres 3D per analitzar la llum circularment polaritzada generada amb la làmina de quart d'ona. Mesurarem la intensitat de la llum transmesa a través de cada vidre de les ulleres per comparar-la amb la intensitat inicial sense ulleres. Això ens permetrà estudiar la selectivitat de les ulleres respecte als diferents estats de polarització i entendre el seu funcionament en la separació de components lumíniques per generar l'efecte tridimensional.

## 2 Llum polaritzada linealment

Primerament, s'ha analitzat la llum polaritzada linealment generada mitjançant un polaritzador lineal situat després de la font de llum LED. Per comprovar l'estat de polarització, s'ha fet rotar un analitzador en intervals de 5 graus, mesurant la intensitat de la llum transmesa en funció de l'angle relatiu entre els eixos dels dos polaritzadors. Els resultats obtinguts s'han ajustat al model teòric de la llei de Malus, que descriu la variació de la intensitat transmesa. Aquest ajust ha permès determinar la direcció de vibració de l'ona i verificar experimentalment el comportament de la polarització lineal. La llei de Malus ve donada per l'expressió:

$$I(\alpha) = I_0 \cos^2(\alpha) \quad \alpha = \beta - \alpha_0 \quad (1)$$

Utilitzant la funció `lsqnonlin` de Matlab (estimació per mínims quadrats no lineals) per a la Equació 1, s'obtenen els valors de  $\alpha_0$  i  $I_0$  junt amb les incerteses de la regressió.

$$\alpha_0 = 133.394 \pm 0.001^\circ \quad I_0 = 13.31 \pm 0.02 \mu\text{A}$$

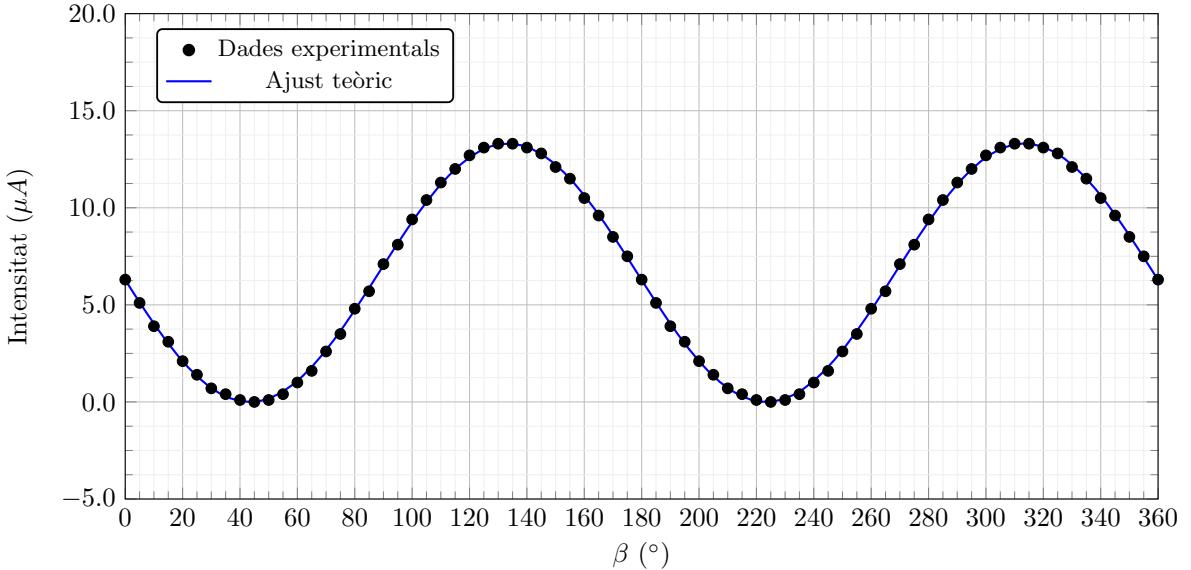


Figura 1: Intensitat de llum polaritzada linealment en funció de l'angle  $\beta$ , amb l'ajust teòric corresponent.

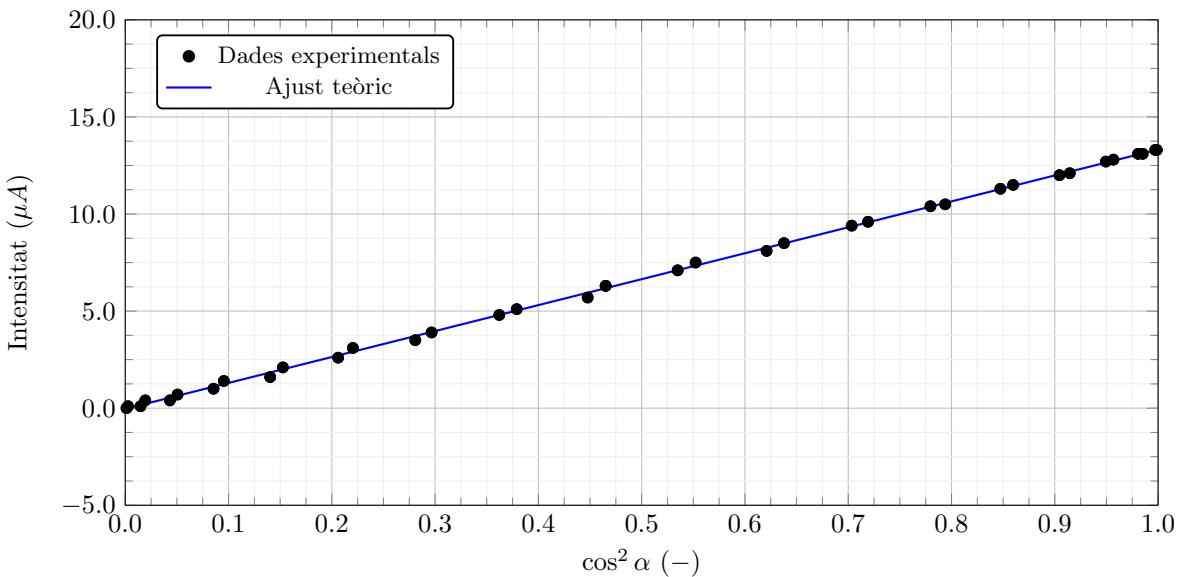


Figura 2: Intensitat de llum polaritzada linealment en funció de  $\cos^2 \alpha$ , amb l'ajust teòric corresponent.

Els valors de la regressió:

$$y = mx + n \quad m = 13.36 \pm 0.4 = I_0^2 \quad n = 0 \pm 0.02 \quad R^2 = 0.9994$$

On el pendent ens indica el valor de la intensitat al quadrat ( $I_0$ ) i el terme independent correspon a la intensitat mínima que s'obtindria quan  $\cos \alpha = 0$ , és a dir, quan l'analitzador i el polaritzador són

perpendiculars. En un experiment ideal hauria de ser zero perquè no es transmetria llum. Si aquest terme no és zero, pot indicar la presència de llum de fons no desitjada o errors en la calibració dels equips.

Podem calcular la desviació quadràtica mitjana segons:

$$DQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_{\text{exp},i} - I_{\text{model},i})^2}{n}} \quad (2)$$

On:

- $I_{\text{exp},i}$  és el valor de la intensitat experimental per al punt  $i$ .
- $I_{\text{model},i}$  és el valor de la intensitat predicta pel model per al mateix punt  $i$ .
- $n$  és el nombre total de punts de dades.

En aquest cas obtenim un resultat de  $DQM = 0.11$

Com es pot veure, el coeficient de regressió és molt proper a 1 i la DQM és prou baixa, fet que ens indica que es compleix la llei de Malus.

### 3 Llum polaritzada el·lípticament

En aquesta secció s'ha generat llum polaritzada el·lípticament combinant un polaritzador lineal i una làmina de quart d'ona. L'orientació relativa d'aquests elements òptics s'ha ajustat per obtenir un estat de polarització el·líptic. Per analitzar aquest estat, s'ha mesurat la intensitat de la llum transmessa en funció de l'angle de l'analitzador, variant-lo en intervals de 5 graus.

Mitjançant l'ajust de les dades experimentals al model teòric corresponent, s'han determinat els paràmetres característics de l'el·ipse de polarització, com ara els semieixos o l'excentricitat de l'el·ipse. Aquest anàlisi permet verificar experimentalment el comportament de la polarització el·líptica i estudiar com depèn dels paràmetres òptics configurats en el muntatge experimental. La llei de Malus aplicada a llum el·lípticament polaritzada ve donada per:

$$I(\phi) = (A_2^2 - A_1^2) \cos^2(\phi) + A_1^2 \quad \phi = \beta - \phi_0 \quad (3)$$

Sabent que l'excentricitat ve donada per:

$$\epsilon = \sqrt{\frac{A_2^2 - A_1^2}{A_2^2}} \quad (4)$$

Utilitzant la funció `lsqnonlin` de Matlab (estimació per mínims quadrats no lineals) per a la Equació 3, s'obtenen els valors de  $A_1$ ,  $A_2$  i  $\phi_0$  junt amb les incerteses de la regressió.

$A_1 = 1.11 \pm 0.01 \text{ } (\mu\text{A})^{\frac{1}{2}}$	$A_2 = 2.953 \pm 0.005 \text{ } (\mu\text{A})^{\frac{1}{2}}$	$\phi_0 = 113.378 \pm 0.003^\circ$
--	--	------------------------------------

L'error en la excentricitat ve donat per:

$$\begin{aligned} \delta\epsilon &= \sqrt{\left(\delta A_1 \frac{\partial \epsilon}{\partial A_1}\right)^2 + \left(\delta A_2 \frac{\partial \epsilon}{\partial A_2}\right)^2} = \sqrt{\left(\delta A_1 \frac{\partial}{\partial A_1} \left[ \sqrt{1 - \frac{A_1^2}{A_2^2}} \right] \right)^2 + \left(\delta A_2 \frac{\partial}{\partial A_2} \left[ \sqrt{\frac{A_2^2 - A_1^2}{A_2^2}} \right] \right)^2} = \\ \delta\epsilon &= \sqrt{\left( \frac{A_1^2 \delta A_2}{A_2^3 \sqrt{1 - \frac{A_1^2}{A_2^2}}} \right)^2 + \left( \frac{A_1 \delta A_1}{A_2 \sqrt{A_2^2 - A_1^2}} \right)^2} \end{aligned}$$

Per a valors positius de  $A_1$  i  $A_2$  (com és el cas), es pot simplificar la expressió anterior:

$$\delta\epsilon = \sqrt{\left( \frac{A_1^2 \delta A_2}{A_2^2 \sqrt{A_2^2 - A_1^2}} \right)^2 + \left( \frac{A_1 \delta A_1}{A_2 \sqrt{A_2^2 - A_1^2}} \right)^2} = \frac{A_1}{A_2 \sqrt{A_2^2 - A_1^2}} \sqrt{\left( \frac{A_1 \delta A_2}{A_2} \right)^2 + \delta A_1^2} =$$

$$\delta\epsilon = \frac{1}{\epsilon} \frac{A_1}{A_2^2} \sqrt{\left(\frac{A_1}{A_2}\delta A_2\right)^2 + \delta A_1^2}$$

De manera que el resultat obtingut és:

$$\epsilon = 0.93 \pm 0.02$$

Per a l'excentricitat teòrica obtenim:

$$\epsilon = 0.93$$

Els valors de l'excentricitat experimental i teòrica són iguals, demostrant que els resultats del laboratori coincideixen amb les prediccions teòriques. Això confirma que el muntatge i les mesures s'han fet correctament i que els components òptics han funcionat com s'esperava. Aquesta coincidència dona confiança tant en l'experiment com en el model utilitzat per descriure l'estat de polarització de la llum.

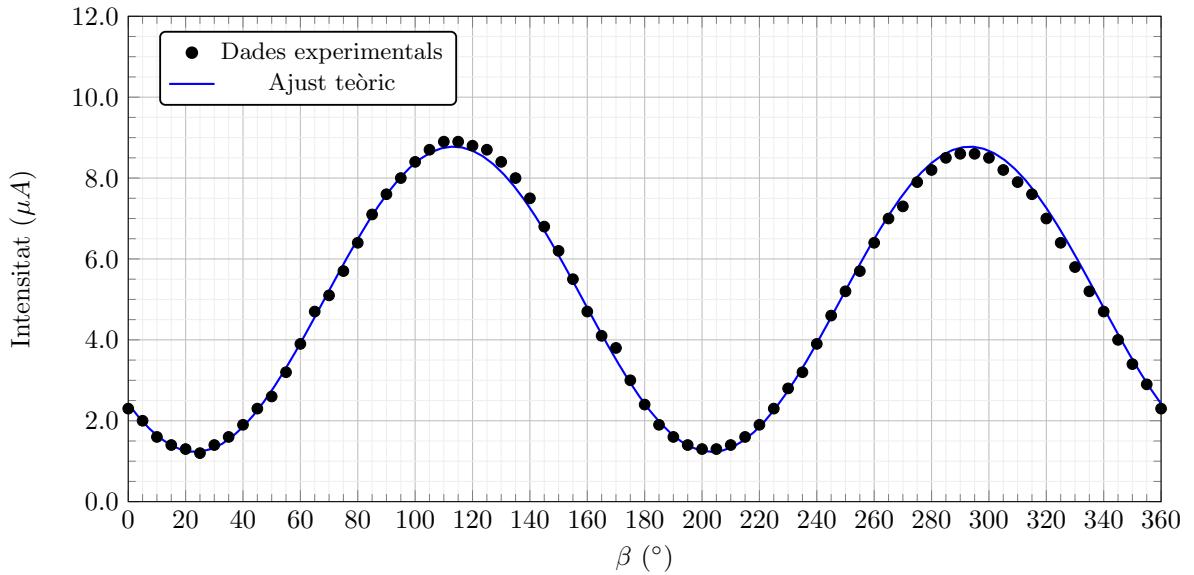


Figura 3: Intensitat de llum polaritzada el·lípticament en funció de l'angle  $\beta$ , amb l'ajust teòric corresponent.

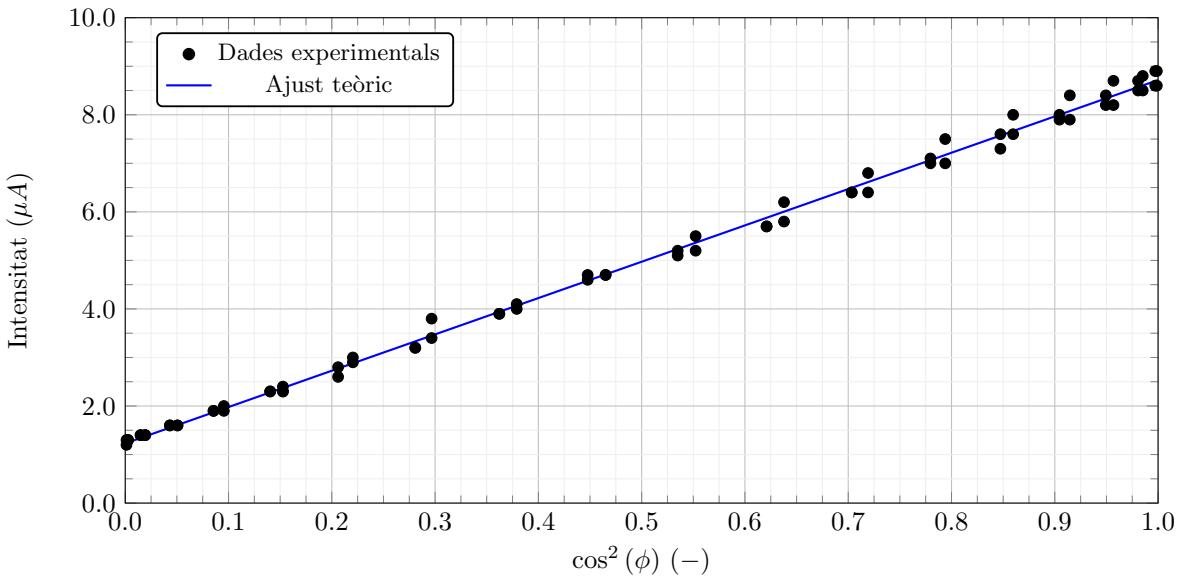


Figura 4: Intensitat de llum polaritzada linealment en funció de  $\cos^2 \phi$ , amb l'ajust teòric corresponent.

Els valors de la regressió:

$$y = mx + n \quad m = 7.49 \pm 0.05 = A_2^2 - A_1^2 \quad n = A_1^2 = 1.23 \pm 0.03 \quad R^2 = 0.997$$

En aquest cas el pendent està relacionat amb la diferència d'intensitat entre els semieixos major i menor de l'el·ipse de polarització. Com més gran sigui el valor absolut del pendent, més excèntrica serà l'el·ipse de polarització, ja que això indica una diferència més gran entre els dos semieixos. El terme independent correspon a la intensitat mínima que es mesura quan  $\cos^2 f = 0$ , és a dir, quan la projecció de la llum sobre l'eix del polaritzador coincideix amb el semieix menor de l'el·ipse. Això representa la contribució mínima de la llum polaritzada al llarg de l'eix menor de l'el·ipse.

En aquest cas, utilitzant la mateixa expressió que a l'apartat anterior, hem obtingut una  $DQM = 0.17$  lleugerament superior que l'anterior però igualment baixa.

Els valors dels semieixos de l'el·ipse de polarització es poden trobar a partir de la recta ajustada obtinguda de la gràfica, que segueix l'equació:

$$I(\phi) = (A_2^2 - A_1^2) \cos^2 (\phi) + A_1^2$$

Per tant,  $A_1$  (semieix menor) vindrà donat per l'arrel del terme independent, mentre que  $A_2$  vindrà donat per l'arrel del terme independent sumat al pendent de la recta:

$$A_1 = \sqrt{n}$$

$$A_2 = \sqrt{n + m}$$

## 4 Llum polaritzada circularment

En aquesta secció s'ha generat llum polaritzada circularment utilitzant una làmina de quart d'ona orientada de manera que la llum polaritzada linealment incident tingui una direcció de polarització a 45 respecte dels eixos principals de la làmina. Aquest ajust garanteix que les dues components perpendiculars del camp elèctric tinguin la mateixa amplitud i un desfasament de  $\pi/2$ , condicions necessàries per obtenir una polarització circular.

Per verificar aquest estat de polarització, s'ha mesurat la intensitat de la llum transmessa en funció de l'angle del polaritzador analitzador, esperant una intensitat constant independentment de l'angle.

També s'ha repetit el procediment amb fonts de llum de diferents longituds d'ona (llum verda i vermella) per comparar les variacions en la constància de la intensitat. Aquest estudi permet analitzar l'efecte de la làmina de quart d'ona sobre la llum en funció del color, així com entendre millor les propietats de la polarització circular.

En teoria, la llum circularment polaritzada hauria de donar una intensitat constant després de passar per un analitzador, ja que la projecció d'un cercle sobre una recta no depèn de l'angle. Tanmateix, en la pràctica poden sorgir variacions per diversos motius:

- Imprecisions en l'alignació dels elements òptics:

Si l'orientació de la làmina de quart d'ona no és exactament a  $45^\circ$ , les components del camp elèctric no tindran la mateixa amplitud, i l'estat de polarització resultant podria ser el·líptic en comptes de circular. En el nostre cas vam poder observar que el mètode de calibració de la posició era força inexacte, ja que el rang on es mesurava una intensitat igual a zero era força gran.

- Dispersió cromàtica de la làmina de quart d'ona:

La làmina de quart d'ona està dissenyada per a una longitud d'ona específica. Quan es treballa amb llum d'un altre color (per exemple, llum vermella o verda), el desfasament introduït pot ser lleugerament diferent de  $\pi/2$ , alterant l'estat de polarització ideal. Cosa que explicaria certes diferències entre els gràfiques dels diferents colors de la llum.

- Errors instrumentals:

El fotodetector o altres equips de mesura poden introduir fluctuacions en les lectures d'intensitat. Aquest considerem que es un dels factors que menys ha influït en el nostre cas, però és important recordar que sempre podem tenir un cert error degut a aquest fet.

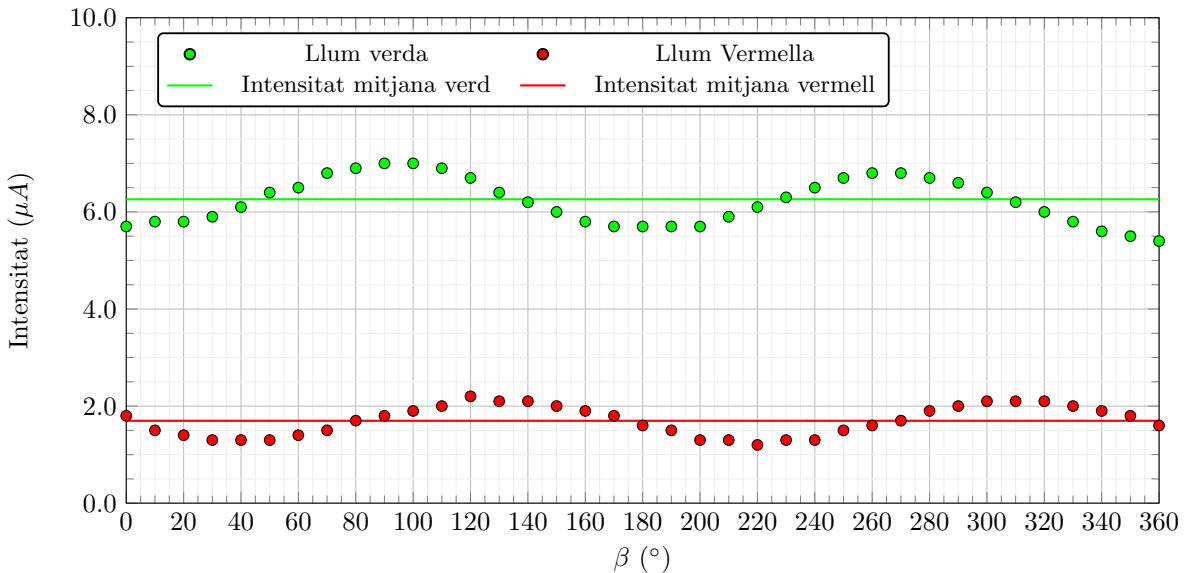


Figura 5: Intensitat de llum polaritzada circularment en funció de l'angle  $\beta$  per al color verd i el vermell, amb les seves respectives intensitats mitjanes.

Els valors obtinguts per a la llum verda i vermella són:

$$\langle I \rangle_{verd} = 6.2 \mu A \quad \sigma_{verd} = 0.5 \mu A \quad \langle I \rangle_{vermell} = 1.7 \mu A \quad \sigma_{vermell} = 0.3 \mu A$$

La làmina de quart d'ona està dissenyada per introduir un desfasament exacte de  $\pi/2$  entre les components del camp elèctric, però aquest desfasament depèn de la longitud d'ona de la llum incident. Si la llum té una longitud d'ona diferent de la que la làmina està optimitzada, el desfasament pot ser lleugerament diferent de  $\pi/2$ , alterant l'estat de polarització.

Diferències en funció del color:

- Per a la llum verda (més propera a la longitud d'ona de disseny de la làmina):
  - El desfasament introduït és més precís, la qual cosa genera una polarització circular hauria de ser gairebé perfecta.
  - L'excentricitat en aquest cas val  $\epsilon = 0.48$ , indicant un resultat no molt corresponent al teòric.
- Per a la llum vermella (més allunyada de la longitud d'ona de disseny):
  - El desfasament no serà exactament  $\pi/2$ , i això farà que la polarització sigui lleugerament el·líptica en lloc de circular.
  - L'excentricitat en aquest cas val  $\epsilon = 0.67$ , indicant una forma el·líptica subtilment més exagerada que per la llum verda.

## 5 Ulleres 3D

La transmitància es calcula com la fracció de llum transmesa a través de cadascun dels vidres de les ulleres respecte a la intensitat total de llum incident:

$$\text{Transmitància} = \frac{I_{\text{transmesa}}}{I_{\text{total}}} \cdot 100$$

### 5.1 Llum verda

Per a la llum verda tenim una intensitat total de llum  $I_{\text{total}} = 20.7\mu A$

- Pel vidre esquerra tenim una transmitància  $T$  de:

$$T_{\text{esquerra}} = 73.9\%$$

- Pel vidre dret tenim una transmitància  $T$  de:

$$T_{\text{dret}} = 1.0\%$$

### 5.2 Llum vermella

Per a la llum vermella tenim una intensitat total de llum  $I_{\text{total}} = 4.3\mu A$

- Pel vidre esquerra tenim una transmitància  $T$  de:

$$T_{\text{esquerra}} = 69.8\%$$

- Pel vidre dret tenim una transmitància  $T$  de:

$$T_{\text{dret}} = 7.0\%$$

Els resultats mostren que el vidre esquerre de les ulleres 3D deixa passar una gran part de la llum tant vermella com verda (al voltant del 70%), mentre que el vidre dret gairebé la bloqueja completament, especialment per a la llum verda (1% de transmitància). Les diferències en la transmitància segons el color indiquen una lleugera variació en l'eficàcia del polaritzador amb diferents longituds d'ona.

Les ulleres 3D es basen en la polarització de la llum per separar les imatges destinades a cada ull. Cada vidre està dissenyat per deixar passar només la llum amb una polarització específica (lineal o circular) i bloquejar-ne la resta. Això permet que cada ull percebi una imatge diferent, generant l'efecte de profunditat característic de les projeccions 3D. La llum que passa per un vidre està polaritzada d'una manera concreta, mentre que la polarització oposada és absorbida pel vidre contrari, assegurant que les imatges no es barregin i que l'efecte tridimensional es percebi correctament.

## 6 Conclusions

En aquesta pràctica, s'ha estudiat el fenomen de la polarització de la llum i les seves aplicacions, validant experimentalment els models teòrics. Hem generat i analitzat diferents estats de polarització (lineal, el·líptic i circular) utilitzant polaritzadors i làmines de quart d'ona. Els resultats obtinguts han estat consistents amb les prediccions teòriques, demostrant la precisió del muntatge experimental i la validesa de les lleis de la polarització.

En el cas de la polarització lineal, les dades han confirmat la llei de Malus, permetent calcular amb precisió la direcció de vibració de l'ona. Per a la polarització el·líptica, l'excentricitat mesurada experimentalment ha coincidit amb els valors teòrics, validant el comportament esperat de l'el·ipse de polarització. En la polarització circular, hem observat petites diferències en funció del color de la llum, evidenciant la dependència espectral de la làmina de quart d'ona, especialment amb llum que s'allunya de la longitud d'ona de disseny.

A més, s'ha analitzat el funcionament de les ulleres 3D, comprovant com cada vidre selecciona la llum polaritzada d'una manera específica, separant les imatges per a cada ull i creant l'efecte tridimensional.

En general, la pràctica ha permès consolidar els conceptes teòrics de la polarització i comprendre millor els seus principis físics, així com la seva aplicació en dispositius òptics.