

TECNOLÓGICO DE MONTERREY

FÍSICA EXPERIMENTAL I

SEMESTRE FEBRERO-JUNIO 2021

---

**Práctica # 3**  
**Polarización y parámetros de Stokes**

---

*Equipo: 2*

Oliver Vicente García Esparza      A00824420

Oscar Augusto Cordero Sosa      A01338289

Profesor: Dr. Raúl Hernández

7 de abril de 2021

# Polarización y parámetros de Stokes

García Esparza O. y Cordero Sosa O.

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

**Resumen:** Se realizó un modelo computacional de un campo óptico con un determinado estado de polarización. Además, implementamos distintos elementos capaces de modificar el estado de polarización de dicho campo. Calculamos numéricamente los parámetros de Stokes a partir de perfiles de intensidad. Simulamos numéricamente en MATLAB una fuente monocromática ideal, diversos polarizadores, un medidor de potencia y dos retardadores, uno de  $\frac{\lambda}{4}$  y otro de  $\frac{\lambda}{2}$ .

**Palabras Clave:** Matlab, polarización, simulación computacional, Parámetros de Stokes, Vector de Jones, Grado de Polarización.

## 1. Introducción

ondas planas.

### 1.1. Objetivos

En esta práctica estudiamos la naturaleza ondulatoria de la luz mediante la verificación del estado de polarización de distintas fuentes. Para esto, modelamos numéricamente un campo óptico con un determinado estado de polarización, además implementamos distintos elementos que modificaron el estado de polarización de dicho campo.

Los objetivos principales de la practica fueron:

- Familiarizarnos con el uso de MATLAB para la implementación de campos ópticos.
- Calcular numéricamente los parámetros de Stokes a partir de perfiles de intensidad.
- Familiarizarnos con el comportamiento de distintos elementos ópticos, tales como retardadores y polarizadores, que afectan un haz de luz.

### 1.2. Marco Teórico

#### 1.2.1. Ondas planas y vector de polarización

Se conoce que la solución a la ecuación de onda (1) obtenida de las relaciones de Maxwell en el vacío, tiene como soluciones particulares las

$$\Delta \tilde{E} = \frac{1}{c^2} \partial_t^2 \tilde{E} \quad (1)$$

Una onda plana transversal compleja que se desplaza a lo largo del eje  $z$  con frecuencia angular  $\omega$  y numero de onda  $k = \omega/c$  se ve representada por la ecuación 2.

$$\tilde{E} = e^{kz - \omega t} (E_{0x} e^{i\phi_x} \hat{x} + E_{0y} e^{i\phi_y} \hat{y}) \quad (2)$$

Sea  $|\tilde{E}|$  la amplitud de la onda, entonces la onda plana se puede representar en base a un vector de polarización  $\hat{\epsilon}$  que indica el vector de oscilación del campo eléctrico en el plano  $xy$ .

$$\tilde{E} = e^{kz - \omega t} |\tilde{E}| \hat{\epsilon} \quad (3)$$

$$\hat{\epsilon} = \frac{E_{0x}}{|\tilde{E}|} e^{i\phi_x} \hat{x} + \frac{E_{0y}}{|\tilde{E}|} e^{i\phi_y} \hat{y} \quad (4)$$

#### 1.2.2. Vectores y matrices de Jones

Los vectores de Jones son una representación matricial del vector de polarización  $\hat{\epsilon}$  aplicable úni-

camente a ondas polarizadas, dada por la ecuación 5.

$$\hat{\epsilon} = \begin{bmatrix} \frac{E_{0x}}{|\vec{E}|} e^{i\phi_x} \\ \frac{E_{0y}}{|\vec{E}|} e^{i\phi_y} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Esta representación permite a través de operaciones matriciales estudiar las transformaciones por elementos ópticos en un arreglo, como serían polarizadores lineales y retardadores de onda. La matriz de Jones para un polarizador lineal con un ángulo de inclinación  $\theta$  respecto al eje vertical se representa en la ecuación 6.

$$M_p(\theta) = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \cos \theta \sin \theta \\ \cos \theta \sin \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

Por otra parte, la matriz de Jones para un retardador que genera un desfase  $\delta$  entre las componentes ortogonales del campo eléctrico con el eje rápido vertical, se representa en la ecuación 7. Para un retardador de media onda  $\delta = \pi$  y para un retardador de cuarto de onda  $\delta = \pi/2$ .

$$M_r(\delta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-i\delta} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Dado que los elementos ópticos pueden rotar y desalinear sus ejes respecto a la vertical, la matriz de rotación es introducida en la ecuación 8 que describe una rotación en sentido horario en un ángulo  $\alpha$ .

$$R(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (8)$$

### 1.2.3. Ley de Malus

La ley de Malus nos permite calcular la intensidad del campo eléctrico resultado que fue transformado por un polarizador lineal que formaba un ángulo  $\theta$  respecto ángulo de inclinación de un haz incidente linealmente polarizado. La intensidad decae

con un factor  $\cos^2 \theta$  que multiplica a la intensidad del haz antes de ser afectado por el polarizador  $I_0$ .

$$I(\theta) = I_0 \cos^2 \theta \quad (9)$$

### 1.2.4. Parámetros de Stokes

Los parámetros de Stokes son cuatro valores que nos permiten describir el estado de polarización de luz incidente, sea polarizada o no polarizada. Estos valores se calculan en base a 4 observables de medición de intensidad usando el arreglo experimental mostrado en la figura 2. Sea  $I(\theta, \delta)$ , donde  $\theta$  es el ángulo de inclinación del polarizador lineal y  $\delta$  el desfase introducido entre las componentes del campo eléctrico por el retardador de onda. Las ecuaciones para calcular los parámetros de Stokes en base a estos observables se muestran en las ecuaciones (10-13).

$$S_0 = I(0, 0) + I(\pi/2, 0) \quad (10)$$

$$S_1 = I(0, 0) - I(\pi/2, 0) \quad (11)$$

$$S_2 = I(\pi/4, 0) - I(-\pi/4, 0) \quad (12)$$

$$S_3 = I(\pi/4, \pi/2) - I(-\pi/4, \pi/2) \quad (13)$$

Por otra parte, estas ecuaciones se pueden reescribir en términos de las componentes del campo eléctrico, como se muestra en las ecuaciones (14-17). Para las cuales se define la diferencia de fase  $\epsilon = \phi_y - \phi_x$ .

$$S_0 = \langle E_{0x}^2 \rangle + \langle E_{0y}^2 \rangle \quad (14)$$

$$S_1 = \langle E_{0x}^2 \rangle_T - \langle E_{0y}^2 \rangle_T \quad (15)$$

$$S_2 = \langle 2E_{0x}E_{0y} \cos \epsilon \rangle_T \quad (16)$$

$$S_3 = \langle 2E_{0x}E_{0y} \sin \epsilon \rangle_T \quad (17)$$

Con esto parámetros se puede calcular el grado de polarización para luz parcialmente polarizada de acuerdo a la ecuación 18.

$$P = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \quad (18)$$

## 2. Procedimiento

### 2.1. Simulación de un campo óptico

Para la primera parte de la práctica, simulamos un campo óptico con un perfil dado por:

$$E(r, \phi) = \left(\frac{r}{\omega_0}\right)^{|m|} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_0^2}\right) \exp(im\phi) \quad (19)$$

Para asegurar una buena resolución en nuestra matriz de evaluación elegimos una potencia de 2 para el número de puntos.

### 2.2. Simulación de la polarización del campo

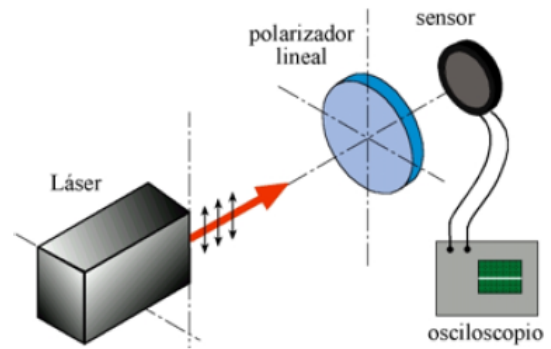
Una vez finalizada la programación de la fuente, continuamos con la simulación del polarizador que modificará a nuestro campo. Este polarizador es capaz de asignarle uno de los siguientes estados de polarización (EP) a nuestro campo:

- EP Vertical
- EP Horizontal
- EP Circular Derecha
- EP Circular Izquierda
- EP Diagonal
- EP Antidiagonal
- Cualquier otro EP que represente un estado lineal o elíptico

### 2.3. Arreglo óptico: Fuente-Polarizador-sensor

El arreglo mostrado en la figura 1 consiste en una fuente de láser verticalmente polarizado que incide sobre un polarizador lineal que puede rotar y finalmente un sensor que registre la intensidad del haz resultante. La transformación del campo eléctrico

co incidente se puede representar con la ecuación 20.

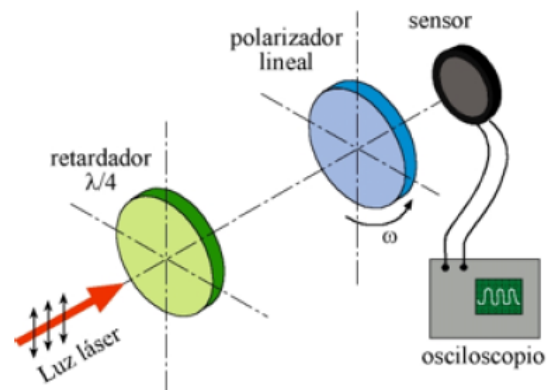


**Figura 1:** Arreglo óptico: Fuente-Polarizador-Sensor

$$\tilde{E}_{out} = M_p(\theta) \tilde{E} \quad (20)$$

### 2.4. Arreglo óptico: Fuente-retardador-Polarizador-sensor

El arreglo mostrado en la figura 2 consiste en agregar un retardo de onda de  $\lambda/4$  o  $\lambda/2$  entre el polarizador lineal y la fuente del arreglo de la figura 1. Dicho retardador de onda también puede rotar de manera independiente.



**Figura 2:** Arreglo óptico: Fuente-retardador-Polarizador-Sensor

Esta configuración de los elementos ópticos tiene como resultado la transformación matricial descrita por la ecuación 21. En esta ecuación, fueron introducidos las matrices de rotación  $R(\alpha)$  la matriz de Jones para el retardador  $M_r$  esta diseñada para cuando el eje rápido alineado a la posición

vertical. La variable  $\alpha$  es el ángulo de inclinación del eje rápido del retardador de onda y el ángulo  $\theta$  es ángulo de inclinación del polarizador.

$$\tilde{E}_{out} = M_p(\theta)R(-\alpha)M_r(\delta)R(\alpha)\tilde{E} \quad (21)$$

Para el caso particular donde se tiene un estado de polarización circular derecho, el retardador de onda  $\lambda/2$  para todo ángulo de inclinación  $\alpha$  lo transforma en un haz con estado polarización circular izquierdo. Lo cual se puede apreciar en las ecuaciones (22-25).

$$J(\alpha) = R(-\alpha)M_r(\pi)R(\alpha) \quad (22)$$

$$J(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos 2\alpha & \sin 2\alpha \\ \sin 2\alpha & -\cos 2\alpha \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$J(\alpha)\hat{\varepsilon}_R = \begin{bmatrix} \cos 2\alpha & \sin 2\alpha \\ \sin 2\alpha & -\cos 2\alpha \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} \quad (24)$$

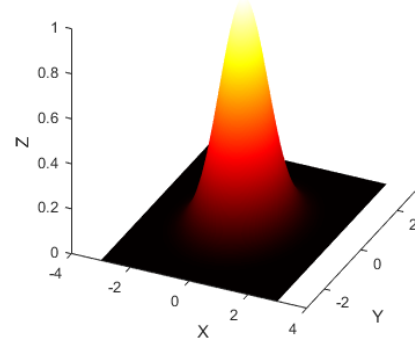
$$J(\alpha)\hat{\varepsilon}_R = \frac{e^{-2i\alpha}}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} \quad (25)$$

Por lo cual, en este caso particular, se espera que la intensidad medida por el sensor, una vez que el haz haya interactuado con el polarizador lineal, sea  $I(\alpha, \theta) = I_0/2$  para cualquier inclinación del polarizador y del retardador de media onda.

### 3. Resultados

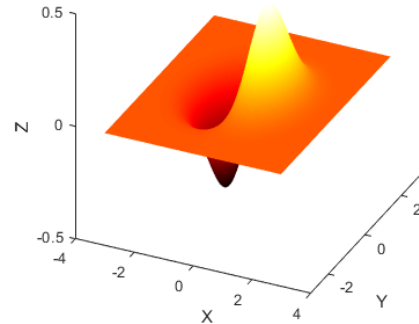
#### 3.1. Simulación de la fuente

Perfil de amplitud para m=0

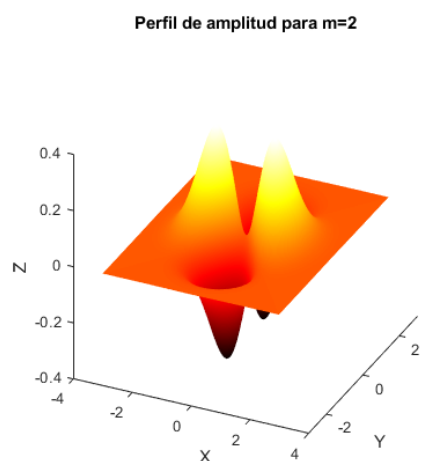


**Figura 3:** Perfil de amplitud de campo eléctrico para carga topológica m=0.

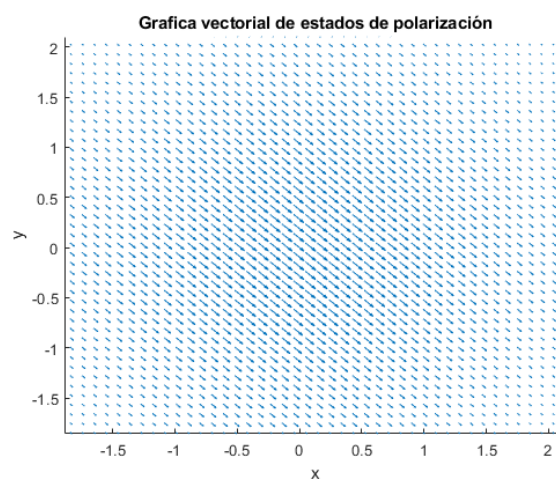
Perfil de amplitud para m=1



**Figura 4:** Perfil de amplitud de campo eléctrico para carga topológica m=1.



**Figura 5:** Perfil de amplitud de campo eléctrico para carga topológica  $m=2$ .

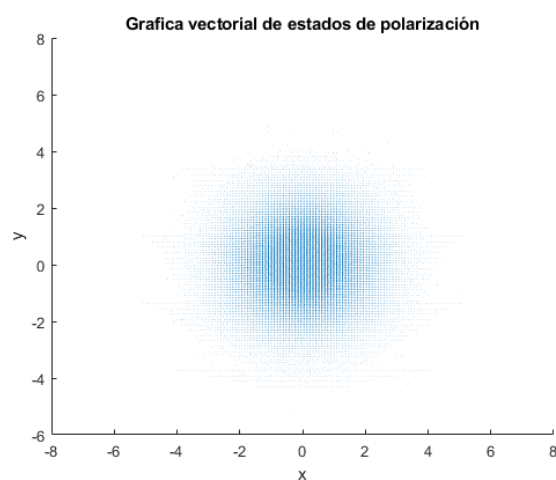


**Figura 7:** Representación vectorial de estado campo eléctrico linealmente polarizado anti-diagonalmente.

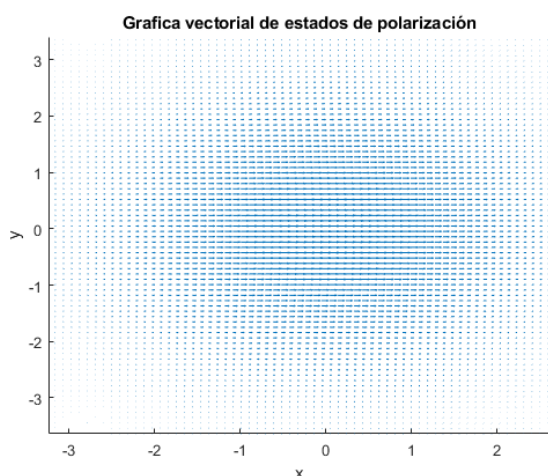
### 3.2. Estados de polarización



**Figura 6:** Representación vectorial de estado campo eléctrico linealmente polarizado diagonalmente.

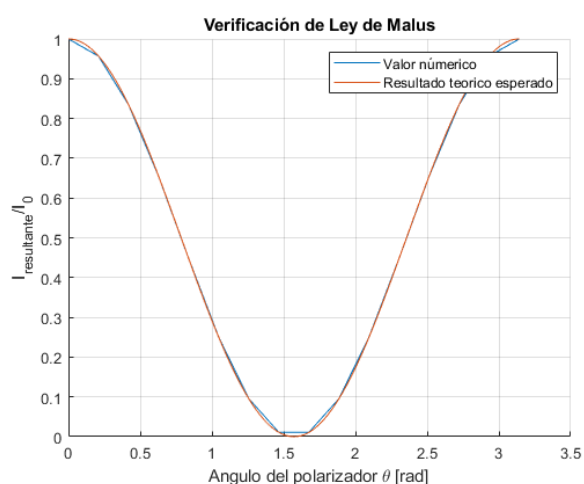


**Figura 8:** Representación vectorial de estado campo eléctrico linealmente polarizado verticalmente.



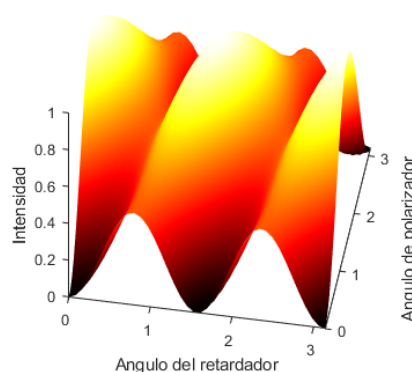
**Figura 9:** Representación vectorial de estado campo eléctrico linealmente polarizado horizontalmente.

### 3.3. Intensidad medida con ley de Malus

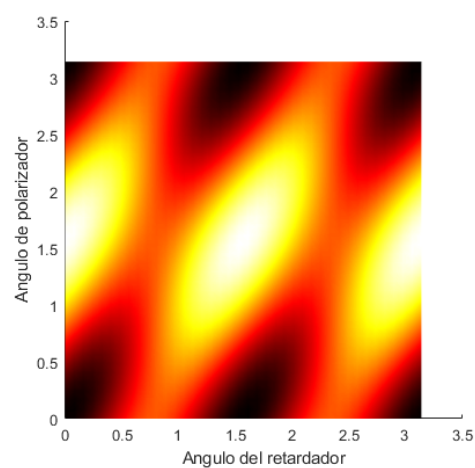


**Figura 10:** Gráfica intensidad vs ángulo del polarizador.

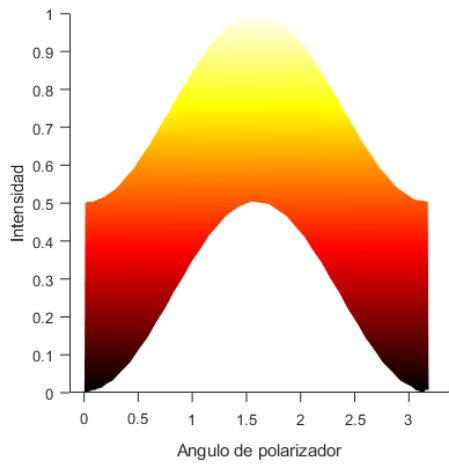
### 3.4. Retardador frente a la fuente verticalmente polarizada



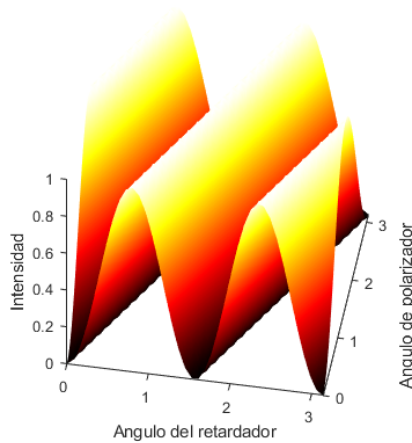
**Figura 11:** Intensidad del haz medida por el sensor del arreglo óptico 2 con un retardador de onda de  $\lambda/4$ .



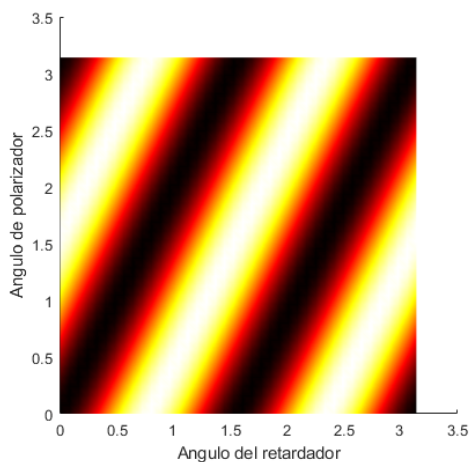
**Figura 12:** Vista superior de la curva de intensidad del retardador  $\lambda/4$ .



**Figura 13:** Vista lateral de la curva de intensidad del retardador  $\lambda/4$ .

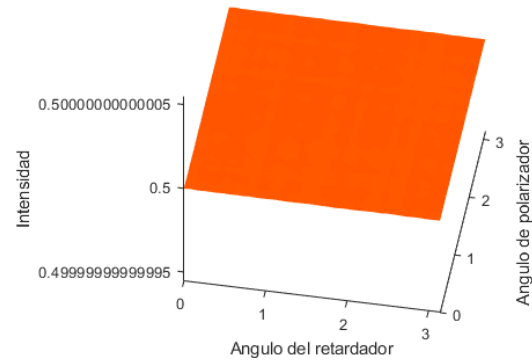


**Figura 14:** Intensidad del haz medida por el sensor del arreglo óptico 2 con un retardador de onda de  $\lambda/2$ .

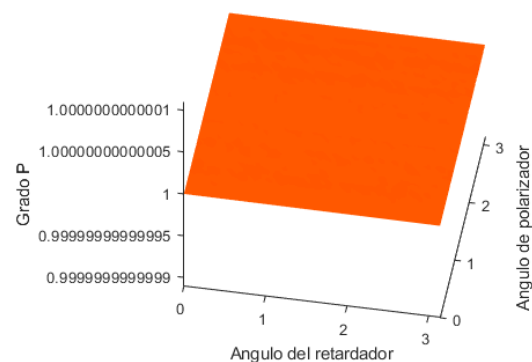


**Figura 15:** Vista superior de la curva de intensidad del retardador  $\lambda/2$ .

### 3.5. Grado de polarización para campo con polarización circular derecha



**Figura 16:** Intensidad del campo eléctrico de salida  $I/I_0$  que interactúa con un retardador de  $\lambda/2$  y un polarizador lineal.



**Figura 17:** Grado de polarización del campo eléctrico de salida que interactúa con un retardador de  $\lambda/2$  y un polarizador lineal; calculado mediante los parámetros de Stokes.



## 4. Análisis de Datos y cálculos

### 4.1. Simulación de la fuente

En primer lugar se obtuvieron los perfiles de amplitud para el perfil de campo óptico con diferentes cargas topológicas. Dicha variable afecta el decaimiento de la amplitud de la onda así como su oscilación espacial en la coordenada esférica polar, lo cual se puede apreciar en las figuras 3, 4 y 5.

### 4.2. Estados de polarización

Para una carga topológica  $m = 0$  se pueden obtener gráficas vectoriales de los estados de polarización en el espacio  $\mathbb{R}^2$ . En las figuras 6, 7, 9 y 8 se aprecian algunas representaciones vectoriales del campo eléctrico. No se han incluido estado polarizados circulares dado que no es posible representar flechas circulares en el software utilizado.

### 4.3. Intensidad medida con ley de Malus

Haciendo uso de una matriz de Jones generada para un polarizador lineal a un ángulo  $\theta$  respecto a la vertical, se ha realizado una simulación numérica para calcular la intensidad del haz que mediría un sensor de la onda resultante como se muestra en la figura 1. Se ha obtenido como resultado que el modelo numérico funciona al ser congruente con lo esperado de la ley de Malus, tal como se muestra en la figura 10.

### 4.4. Retardador frente a la fuente verticalmente polarizada

Por otra parte, en el contexto del arreglo 2, se ha proseguido a simular con una matriz de Jones el retardador de  $\lambda/4$  así como el polarizador lineal, los cuales ambos elementos ópticos pueden rotar y actúan sobre un campo eléctrico de carga topológica nula verticalmente polarizado. El resultado de la onda resultante dependiente de los ángulos de inclinación de los dos elementos ópticos mencionados

dan como resultado una gráfica en tres dimensiones, la cual se observa en la figura 11.

Haciendo uso de la figura 12 y 13, se observa que se tienen máximos locales con valores de intensidad  $0,5I_0$  donde  $I_0$  es la intensidad del haz que sale del láser sin ser afectada por el polarizador y el retardador. Dichos eventos ocurren cuando el polarizador lineal forma un ángulo  $\theta = 90^\circ$  con respecto a la vertical. Por otra parte, para otras inclinaciones del polarizador de onda se obtiene que la variación puede llegar hasta un valor mínimo absoluto de cero para la intensidad calculada.

Por otra parte, al utilizar un retardador de  $\lambda/2$ , no se obtienen puntos de inflexión como en el caso del retardador de  $\lambda/4$ ; solo se obtienen mínimos absolutos de valor  $\min(I) = 0$  y máximos absolutos de valor  $\max(I) = I_0$ . La rotación del retardador solo genera un desfase lineal en la curvas de la intensidad medida para valor fijo del ángulo de inclinación del retardador.

### 4.5. Grado de polarización para campo con polarización circular derecha

De acuerdo a la simulación numérica de sistema óptico representado en la figura 2, el ángulo de inclinación del retardador no afecta en la intensidad medida por el sensor  $I(\alpha, \theta) = I_0/2$ , de igual manera el ángulo de inclinación del polarizador lineal tampoco afecta de acuerdo al resultado mostrado en la figura 16. Además, el haz de salida del sistema óptico es totalmente polarizado para cualquier inclinación de los elementos involucrados, tal como se muestra en la figura 17 el grado de polarización con un valor  $P(\alpha, \theta) = 1$ .

## 5. Resultados numéricos contra teóricos

Los resultados numéricos fueron congruentes con los teóricamente esperados. En la sección 3.1 se pudieron observar los efectos de la carga topológica  $m$ , que generaba elevaciones y valles en la superficies. Por otra parte, en la sección 3.2 fue posible

representar el campo eléctrico con estados de polarización que no tuvieran parte compleja, debido a que no es posible representar estados rotacionales y elípticos por la limitación del software. En la sección 3.3 se comprobó que a través de operación las matrices de Jones con el campo eléctrico incidente es posible recrear la señal de intensidad de salida esperada por la Ley de Malus; sin embargo, la curva obtenida a través de la simulación numérica tiene menor resolución debido a que es necesario realizar una mayor cantidad de operaciones matriciales. En la sección 3.4 el resultado fue congruente con la teoría ya que se puede explicar dado que solo la mitad de la energía se transmite a través de un polarizador si la luz incidente es circularmente polarizada. Finalmente, en la sección 3.5, se obtuvo el resultado esperado para la intensidad que es independiente del ángulo de inclinación del retardador ya que transforma el estado de polarización circular derecha a un estado circular izquierdo; además, el ángulo de inclinación del polarizador lineal no afecta dado que un estado de polarización circular siempre transmite solo la mitad de energía a través de este dispositivo. Sin embargo, solo se pudo calcular el grado de polarización con los parámetros de Stokes dado que la onda no estaba linealmente polarizada para usar otros métodos.

## 6. Conclusiones

Se puede concluir que las matrices de Jones son útiles para calcular las señales de salida de los que campos eléctricos que interactúan con elementos ópticos que transforman linealmente el haz incidente en base a sus componentes  $E_x$ ,  $E_y$ . De igual manera, se aprecio la utilidad de utilizar la representación matricial para trabajar con retardadores con su eje rápido no alineado verticalmente. Finalmente, se reconoce la utilidad de los parámetros de Stokes para conocer el grado de polarización de luz parcialmente polarizada.

## Referencias

[1] M. Alonso & E.J. Finn, Física, Volumen II: Campos y Ondas (Fondo Educativo Interamericano, S. A., D.F, México, 1976)

[2] Hecht, Eugene, and Raffaello Dal Col. Óptica. Addison Wesley, 2000.

## Código de Matlab

```

1 clear, clc, close all, format compact;
2
3 %% Definir campo ptico ←
   gaussiano
4 n=7; % Resoluci n 2^n puntos
5 w0=2; % Anchura
6 m =0; % Carga topologica
7 lado=linspace(-3*w0,3*w0,2^n); % ←
   se considera un sensor ←
   cuadrado de lado 2*(3*w0)
8 [x,y]= meshgrid(lado);
9 [phi,r]=cart2pol(x,y);
10 E=(r/w0).^abs(m).*exp(-(r/w0).^2)←
   .*exp(1i*m*phi);
11
12 figure(1)
13 hold on
14 surf(x/w0,y/w0,real(E)), shading ←
   interp, axis square, colormap(←
   hot), view(25,30)
15 xlabel('X'), ylabel('Y'), zlabel(←
   'Z'), title("Perfil de ←
   amplitud para m=" + num2str(m)←
   )
16 hold off
17
18 %% Defini ci n de estados de ←
   polarizaci n en vectores de ←
   Jones
19 H=[1;0]; % horizontal
20 V=[0;1]; % vertical
21 R=[1;-1i]/sqrt(2); % circular ←
   derecho
22 L=[1;1i]/sqrt(2); % circular ←
   izquierdo
23 D=[1;1]/sqrt(2); % diagonal
24 AD=[1;-1]/sqrt(2); % antidiagonal
25
26 % cualquier otra combinaci n
27 E0=1; % Amplitud
28 angulo_de_inclinacion=pi/5;
29 E0x=E0*cos(angulo_de_inclinacion)←
   ; %
30 E0y=E0*sin(angulo_de_inclinacion)←
   ; %

```

```

31 delta=pi/3; % FaseEnY - FaseEnX
32 ep= [E0x/E0;E0y*exp(1i*delta)/E0]; % vector de polarizaci n
    ]; % vector de polarizaci n del campo
33
34 %% Polarizaci n utilizada para este trabajo
35 ep=H;
36 %ep=H;
37 Ex=E*ep(1);
38 Ey=E*ep(2);
39
40 %% Grafica vectorial de estados de polarizaci n
41 figure(2)
42 hold on
43 quiver(x,y,Ex,Ey)
44 xlabel('x'), ylabel('y'), title("Grafica vectorial de estados
    de polarizaci n")
45 hold off
46
47 %% Definici n de un polarizador lineal (matriz de Jones)
48 na=16; %Numero de angulos diferentes de inclinaci n del
    polarizador
49 a_pl=linspace(0,pi,na); %Vector de angulos de inclinaci n dle
    polarizador
50
51 I=zeros(1,na); %Preasignaci n de memoria
52 for c=1:na
53     %a_pl(c) c-esimo ngulo de inclinaci n del polarizador lineal
54     ep_pl= [cos(a_pl(c));sin(a_pl(c))]; % vector de polarizaci n del
    polarizador
55     M_pl=(ep_pl)*(ep_pl'); % matriz de polarizador lineal angulo a_pl
56     Ex_out=Ex*M_pl(1,1)+Ey*M_pl(1,2);
57     Ey_out=Ex*M_pl(2,1)+Ey*M_pl(2,2);
58     E_out=sqrt(abs(Ex_out).^2 + abs(Ey_out).^2);
59
60 %% Validaci n de ley de Malus
61 h=(max(lado)-min(lado))/(2^n-1);
62 I(c)=sum(sum(E_out.^2))*h^2;
63 end
64
65 I0=sum(sum(abs(E).^2))*h^2;
66 figure(3)
67 hold on
68 theta=linspace(0,pi,1000);
69 plot(a_pl,I/I0,theta,(cos(theta)).^2)
70 %plot(theta,(cos(theta)).^2,a_pl,I/I0)
71 xlabel('Angulo del polarizador \theta [rad]')
72 ylabel('I_{resultante}/I_0')
73 title('Verificaci n de Ley de Malus')
74 legend(["Valor n merico" "Resultado teorico esperado"],'Location','northeast')
75 grid on
76 hold off
77
78 %% De aqu en adelante, se utilizar un estado de polarizaci n vertical
79 ep=V;
80 Ex=E*ep(1);
81 Ey=E*ep(2);
82
83 %% Definici n de un retardador de 1/4 de lambda
84 delta=pi/2; %desfase introducido de y - x
85 %M=[1 0; 0 exp(-1i*delta)];
86 M=[exp(+1i*delta/2) 0; 0 exp(-1i*delta/2)];
87
88 %% Ajustar retardador de 1/4 de onda con polarizador lineal para
    minimizar variaci n de la amplitud de la se al de potencia
89 q=40; %Numero de angulos diferentes de inclinaci n
90 phi=linspace(0,pi,q); %angulo de inclinaci n del retardador
91 [k1, k2]=meshgrid(phi);
92 for cc=1:q %contador para angulo de rotacion del polarizador lineal
93     for c=1:q %contador para angulo de rotacion de retardador

```

```

94     rotar_alfa=[cos(k1(c,cc)) sin(k1(c,cc)); -sin(k1(c,cc)) cos(k1(c,cc))]; %rotacion horaria si alfa>0
95     ep_out=(rotar_alfa^-1)*M*rotar_alfa*ep;
96     Ex_out=E*ep_out(1);
97     Ey_out=E*ep_out(2);
98
99     %% Utilizando una proyección para el polarizador lineal
100    Up=[cos(k2(c,cc)) sin(k2(c,cc))];
101    Proy = Ex_out*Up(1) + Ey_out*Up(2);
102    Ex_out = Proy*Up(1);
103    Ey_out = Proy*Up(2);
104
105    E_out=sqrt(abs(Ex_out).^2 + abs(Ey_out).^2);
106    I(c,cc)=sum(sum(E_out.^2))*h^2;
107 end
108 end
109
110 %% Grafica 3D cuando el polarizador y el retardador se rotan simultaneamente
111 figure (14)
112 hold on
113 surf(k1,k2,I/I0), shading interp, axis square, colormap(hot), view(10,45)
114 xlabel('Angulo del retardador'), ylabel('Angulo de polarizador'), zlabel('Intensidad')
115 hold off
116
117 %% Definición de retardador de 1/2 de lambda
118 delta=pi; %desfase introducido de y - x
119 %M=[1 0; 0 exp(-1i*delta)];
120 M=[exp(+1i*delta/2) 0; 0 exp(-1i*delta/2)];
121
122 %% Ajustar retardador de 1/2 de onda con polarizador lineal para minimizar variación de la amplitud de la señal de potencia
123 q=40; %Numero de angulos diferentes de inclinación

124 phi=linspace(0,pi,q); %angulo de inclinación del retardador
125 [k1, k2]=meshgrid(phi);
126 for cc=1:q %contador para angulo de rotación del polarizador lineal
127     for c=1:q %contador para angulo de rotación de retardador
128         rotar_alfa=[cos(k1(c,cc)) sin(k1(c,cc)); -sin(k1(c,cc)) cos(k1(c,cc))]; %rotacion horaria si alfa>0
129         ep_out=(rotar_alfa^-1)*M*rotar_alfa*ep;
130         Ex_out=E*ep_out(1);
131         Ey_out=E*ep_out(2);
132
133         %% Utilizando una proyección para el polarizador lineal
134         Up=[cos(k2(c,cc)) sin(k2(c,cc))];
135         Proy = Ex_out*Up(1) + Ey_out*Up(2);
136         Ex_out = Proy*Up(1);
137         Ey_out = Proy*Up(2);
138
139         E_out=sqrt(abs(Ex_out).^2 + abs(Ey_out).^2);
140         I(c,cc)=sum(sum(E_out.^2))*h^2;
141     end
142 end
143
144 %% Grafica 3D cuando el polarizador y el retardador se rotan simultaneamente
145 figure (15)
146 hold on
147 surf(k1,k2,I/I0), shading interp, axis square, colormap(hot), view(10,45)
148 xlabel('Angulo del retardador'), ylabel('Angulo de polarizador'), zlabel('Intensidad')
149 hold off
150
151 %% Retardador de media onda para polarización circular
152 %% Definición de retardador de 1/2 de lambda
153 delta=pi; %desfase introducido de y - x
154 M=[1 0; 0 exp(-1i*delta)];

```

```

155 %M=[exp(+1i*delta/2) 0; 0 exp(-1i*delta/2)];
156
157 %% Ajustar retardador de 1/2 de onda con polarizador lineal para minimizar variación de la amplitud de la señal de potencia
158 q=40; %Numero de angulos diferentes de inclinación
159 phi=linspace(0,pi,q); %angulo de inclinación del retardador
160 [k1, k2]=meshgrid(phi);
161 I=zeros(q,q); S0=I; S1=I; S2=I; S3=I;
162 ep=R;
163 for cc=1:q %contador para angulo de rotación del polarizador lineal
164 for c=1:q %contador para angulo de rotación de retardador
165     rotar_alfa=[cos(k1(c,cc)) sin(k1(c,cc)); -sin(k1(c,cc)) cos(k1(c,cc))]; %rotación horaria si alfa>0
166     ep_out=(rotar_alfa^-1)*M*rotar_alfa*ep;
167     Ex_out=E*ep_out(1);
168     Ey_out=E*ep_out(2);
169
170     %% Utilizando una proyección para el polarizador lineal
171     Up=[cos(k2(c,cc)) sin(k2(c,cc)); sin(k2(c,cc)) -cos(k2(c,cc))];
172     Proy = Ex_out*Up(1) + Ey_out*Up(2);
173     Ex_out = Proy*Up(1);
174     Ey_out = Proy*Up(2);
175
176     %% Proyección con matrices
177     %rotar_beta=[cos(k2(c,cc)) sin(k2(c,cc)); -sin(k2(c,cc)) cos(k2(c,cc))];
178     %ep_out=(rotar_beta^-1)*[1;0].*(rotar_beta*(rotar_alfa^-1)*M*rotar_alfa*ep);
179     %Ex_out=E*ep_out(1);
180     %Ey_out=E*ep_out(2);
181
182     %M_pl=(ep_pl)*(ep_pl'); %matriz de polarizador lineal angulo a_pl
183     %ep_out=M_pl*ep_out;
184     %Ex_out=E*ep_out(1);
185     %Ey_out=E*ep_out(2);
186
187     E_out=sqrt(abs(Ex_out).^2 + abs(Ey_out).^2);
188     I(c,cc)=sum(sum(E_out.^2))*h^2;
189
190     %%Parametros de stokes respecto k1,k2 (dependiente de 2 dimensiones)
191     S0(c,cc)=sum(sum(abs(Ex_out).^2))*h^2+sum(sum(abs(Ey_out).^2))*h^2;
192     S1(c,cc)=sum(sum(abs(Ex_out).^2))*h^2-sum(sum(abs(Ey_out).^2))*h^2; %calculo de epsilon = fase_y-fase_x
193     %efx=angle(Ex_out);
194     %efy=angle(Ey_out);
195     %ef=efy-efx;
196     S2(c,cc)=2*sum(sum(real(Ey_out.*conj(Ex_out))))*h^2;
197     S3(c,cc)=2*sum(sum(imag(Ey_out.*conj(Ex_out))))*h^2;
198
199 end
200 end
201
202 %% Grafica 3D cuando el polarizador y el retardador se rotan simultaneamente
203 figure (16)
204 hold on
205 surf(k1,k2,I/I0), shading interp, axis square, colormap(hot), view(10,45)
206 xlabel('Angulo del retardador'), ylabel('Angulo de polarizador'), zlabel('Intensidad')
207 hold off
208
209 %% Grafica 3D de grado P
210 P=sqrt(S1.^2+S2.^2+S3.^2)./S0;
211 figure (17)
212 hold on
213 surf(k1,k2,P), shading interp, axis square, colormap(hot),

```

```
view(10,45)
214 xlabel('Angulo del retardador'), ←
    ylabel('Angulo de polarizador'←
    ), zlabel('Grado P')
215 hold off
216
217 %% Obtencion de grado P usando ←
    medicion perpendicular y ←
    paralela del polarizador
218 I_min=max(I);
219 I_max=min(I);
220 P=(I_max-I_min)/(I_max+I_min)
```

---