

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍA DE
TELECOMUNICACIÓN



“Desarrollo de una herramienta software para la evaluación del
comportamiento de la polarización en cavidades láser”

TRABAJO FÍN DE GRADO

Diciembre - 2022

AUTOR: Ángel Saura Benimeli

DIRECTOR: Adrián José Torregrosa Fuentes

ÍNDICE GENERAL

1. Introducción.....	5
1.1 Objetivos.....	5
1.2 Estructura del proyecto.....	5
2. Estudio de la polarización del laser.....	7
2.1 Obtención de la intensidad del campo eléctrico.....	8
2.2 Polarización de las ondas planas.....	10
2.3 Polarización lineal.....	11
2.3.1 Polarización lineal vertical.....	11
2.3.2 Polarización lineal horizontal.....	11
2.3.3 Polarización planar.....	12
2.4 Polarización Circular.....	13
2.4.1 Polarización circular levógira.....	14
2.4.2 Polarización circular dextrógira.....	15
2.5 Matrices de las ondas.....	15
2.5.1 Polarización lineal vertical.....	16
2.5.2 Polarización lineal horizontal.....	16
2.5.3 Polarización planar (Ángulo respecto a los ejes).....	17
2.5.4 Polarización Circular.....	17
2.5.4.1 Polarización levógira.....	17
2.5.4.2 Polarización dextrógira.....	19
3. Estudio de la cavidad láser.....	23
3.1 Matrices de Jones y su importancia en las cavidades.....	24
3.1.1 Matriz round-trip.....	24
3.2 Estudio de los Polarizadores.....	26
3.2.1 Absorción o pérdidas selectivas.....	29
3.2.2 Reflexión selectiva en materiales isótropos.....	30
3.2.3 Materiales Birrefringentes.....	30
3.3 Rotadores de la polarización.....	30
3.4 Divisores y combinadores de la polarización.....	33
3.4.1 División y combinación con prismas.....	34
3.4.1.1 Prisma de Rochon.....	34
3.4.1.2 Prisma Glan – Thompson.....	34
3.4.2 Dependiente del ángulo de incidencia.....	35
3.5 Espejos.....	36
3.6 Retardadores de onda.....	39
3.6.1 Rotación.....	40
3.6.2 Control de la polarización mediante efecto electro-óptico.....	41
3.7 Valores Propios.....	43
3.7.1 Definición y explicación de los valores propios.....	43
3.7.2 Análisis de los estados propios asociados a la matriz de round – trip.....	45
4. Ejemplos de las caracterizaciones de distintos elementos y cavidades A través de las matrices de Jones y sus valores propios.....	46
4.1 Ejemplo del cálculo matricial de un elemento birrefringente.....	47
4.2 Cálculo matricial y obtención de los valores propios de una cavidad formada por cuatro elementos.....	50

4.2.1 Definición de los elementos de la cavidad.....	50
4.2.1.1 Matriz del espejo 1.....	52
4.2.1.2 Matriz del espejo 2.....	52
4.2.1.3 Matriz del elemento birrefringente 1.....	54
4.2.1.4 Matriz del elemento birrefringente 2.....	55
4.2.2 Análisis sobre el punto uno.....	56
4.2.2.1 Obtención de la matriz round-trip.....	56
4.2.2.2 Código y Representación de los valores propios.....	58
4.2.3 Análisis sobre el punto dos.....	60
4.2.3.1 Obtención de la matriz round-trip.....	60
4.2.3.2 Código y representación de los valores propios.....	61
4.2.4 Análisis y comparación de los resultados.....	63
5. Programa software creado para la obtención del comportamiento de una cavidad con elementos polarizantes.....	65
5.1 Diagrama de flujo y estructura del programa.....	65
5.1.1 Interfaz para la introducción de los datos de los espejos.....	67
5.1.2 Interfaz para la introducción de los datos de los elementos birrefringentes.....	68
5.1.2.1 Opción de AR del elemento.....	69
5.1.2.2 Implementación de la dependencia del efecto electro-óptico.....	71
5.1.3 Opciones finales del programa.....	71
5.1.3.1 Representación gráfica.....	71
5.1.3.2 Resultado General.....	71
5.2 Problemas encontrados.....	72
5.2.1 Instrucción de valores propios (eigenvalues) en Matlab.....	72
5.2.2 Expresión final del programa.....	78
5.2.3 Problema con ciertas cavidades que dependiesen tanto del ángulo de rotación como del efecto electro-óptico.....	79
5.2.4 Problema con el número de elementos.....	79
6. Validación de la herramienta software mediante la comparación frente a las medidas experimentales.....	81
6.1 Montaje experimental 1.....	82
6.2 Montaje experimental 2.....	84
Conclusiones.....	89
Anexos.....	92
Bibliografía.....	93



1. Introducción

1.1 Objetivos

Existen aplicaciones que requieren el uso de haces láser con características muy específicas, entre ellas el estado de la polarización con la que emite la fuente láser. En general, las cavidades resonantes donde tienen lugar la oscilación láser está compuesta además del medio de ganancia o activo y por los elementos reflexivos, por un conjunto de elementos ópticos en el interior de la cavidad para conseguir un determinado propósito o aplicación. Estos elementos pueden alterar las características de la oscilación láser, en particular el estado de la polarización de la onda.

El objetivo de este trabajo será la realización de un programa software que evalúe, prediga o simule el comportamiento del estado de polarización de la oscilación láser que tiene lugar en cavidades resonantes en el láser, compuestas por múltiples elementos ópticos. Las características de birrefringencia, reflexión y dependencia de los materiales y tratamientos dieléctricos de dichos elementos pueden afectar de forma significativa las características de la polarización de la onda generada. Así podremos obtener una herramienta de trabajo útil, cómoda y eficaz con la que podremos calcular un comportamiento lo más parecido posible al caso real.

Este programa ya citado será el resultado final de nuestros estudios sobre las alteraciones de los estados de un laser a una determinada longitud de onda siendo dichas modificaciones ejercidas por diferentes elementos que compondrán una cavidad óptica.

Por lo tanto y finalmente veremos si las estimaciones de dicho programa son realmente útiles y por lo tanto comparables con respecto a los casos reales ya que así podremos hacernos a una idea del comportamiento de la polarización antes siquiera de realizar una simulación real.

1.2 Estructura del proyecto

En la elaboración del proyecto se ha seguido un esquema intuitivo, empezando con los estudios previos teóricos, posteriormente trabajando con las matrices asociadas a los elementos ópticos, cuyo objetivo es el de calcular el comportamiento de ciertas cavidades. Por último crearemos la herramienta software y compararemos sus resultados con respecto a la realidad.

Por lo tanto, en primer lugar deberemos analizar los estados básicos de la polarización de la onda, estudiando esta característica podremos tener un conocimiento general de dichos comportamientos.

Después realizaremos un estudio de los elementos que compondrán la cavidad, analizando cada uno de ellos y observando las características que alteran a la onda

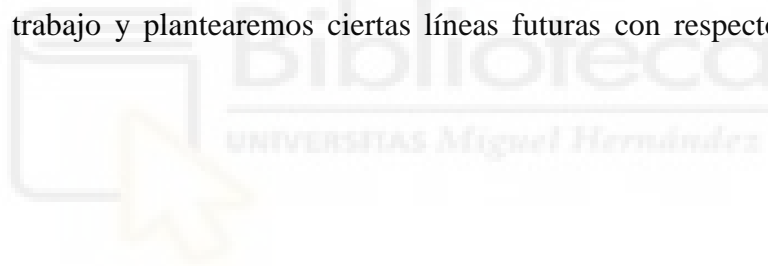
incidente. Obteniendo como conclusión que estas señales variarán dependiendo del espacio por el que se han propagado.

Con los estudios teóricos anteriores y habiendo definido que son tanto las matrices de Jones, como la matriz round-trip(o matriz de oscilación completa) y finalmente habiendo obtenido la definición de valores propios, propondremos casos donde analizaremos ciertos elementos y cavidades que nos serán de utilidad a la hora de desarrollar la herramienta software.

Posteriormente, analizaremos nuestro programa que entre otras cosas, nos permitirá aumentar el número de elementos que presente una cavidad y por lo tanto, podremos examinar sistemas mucho más complejos de una forma mucho más cómoda. Además de lo anteriormente mencionado podremos obtener resultados de cavidades más pequeñas con una menor cantidad de tiempo.

Utilizaremos la herramienta software para crear una relación con respecto a casos de experimentación real, estableciendo las mismas condiciones y analizando las diferencias que presentan entre sí. Éstos podrían haberse producido al no haber contado con ciertos valores y parámetros que afectan a los resultados finales.

Por último estableceremos las conclusiones que hemos obtenido después de haber realizado este trabajo y plantearemos ciertas líneas futuras con respecto al programa realizado.



2. Estudio de la polarización del laser

Un laser es un dispositivo que producirá una emisión de un haz de luz coherente en una dirección del espacio determinada mediante un proceso de amplificación óptica, dicho laser variará dependiendo de las características físicas del mismo, atendiendo así a la necesidad que se tenga para el funcionamiento que queramos obtener.

Los láseres presentan la característica de emitir a una longitud de onda, por lo que solo transmitirán una frecuencia, esto será importante ya que especificando la longitud de onda podremos utilizar estos láseres para unas aplicaciones u otras en función de las necesidades del usuario.

Estos tendrán diferentes características dignas de distintos estudios, pero las que en nuestro caso vamos a examinar serán las polarizaciones y en el caso que nos concierne, estudiaremos láseres con emisión de ondas planas.

Ya habiendo impuesto las condiciones de nuestro láser, podremos indagar en la polarización, esta depende intrínsecamente del campo eléctrico de la onda (tanto en amplitud como en fase), al tratarse de ondas planas implicará que en nuestro espacio tridimensional, el campo eléctrico será tangencial a la dirección de propagación del laser, por lo que nuestras polarizaciones estarán contenidas en un plano que cumpla esta condición.

Las polarizaciones están definidas en un plano (espacio bidimensional), esto implicará que de una forma general, la polarización se describa de forma elíptica, ya que las componentes (x-y) de la onda normalmente varían y difieren entre sí. Habrán casos excepcionales en los que la polarización presente otro tipo de formas, este tipo de casos son variaciones que surgen a partir de este caso general.

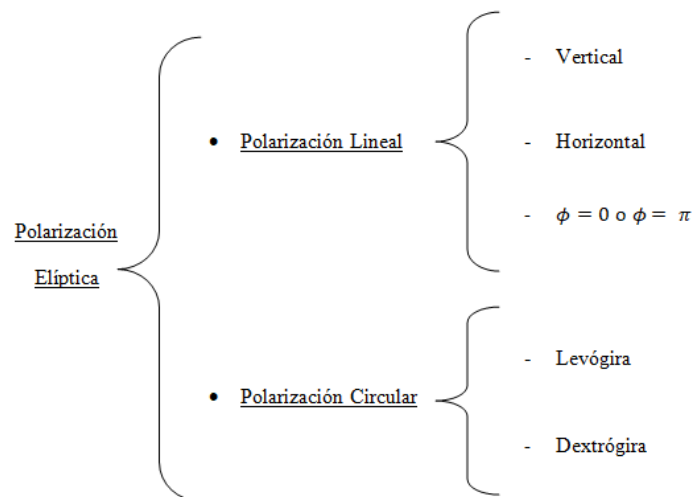


Figura 1.1. Tipos específicos de la polarización elíptica

Para poder definir mejor estas polarizaciones debemos establecer el espacio en el que las estamos estudiando, así que para ello utilizaremos los ejes de coordenadas (x,y,z),

donde tomaremos z , como el eje de propagación del laser y por lo tanto siendo x - y el plano de polarización de la onda.

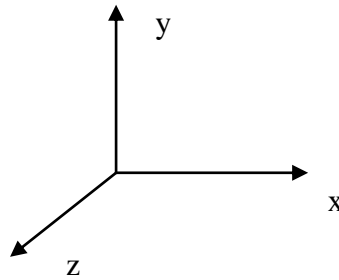


Figura 1.2 .Coordenadas utilizadas para la polarización y propagación de la onda

La realización del estudio de las polarizaciones será examinada tanto de forma física, hablando del porqué adoptan dichas formas en específico, como a nivel matemático, obteniendo expresiones que nos permitirán intuir y describir el comportamiento de la onda de forma matricial.

Las polarizaciones son características asociadas a los campos eléctricos, pero, para nuestro caso y debido a la instrumentación que manejaremos a la hora de captar la onda en los escenarios reales, es decir, a los receptores de las ondas transmitidas o también denominados detectores ópticos, harán que nos interese trabajar con la intensidad asociada a la señal más que a los campos eléctricos.

Hemos numerado y definido que son las polarizaciones asociadas a los campos eléctricos, dándonos cuenta de su importancia y la relación que presentan con estos, pero, en un escenario real trabajaremos con intensidades. Esto se debe a que los receptores (también denominados detectores ópticos), no captan campos eléctricos sino que estaremos trabajando en unidades de potencia y más específicamente en intensidades de campo eléctrico.

Por lo tanto trabajaremos a partir de ahora con intensidades de campo eléctrico debido a estas razones.

2.1 Obtención de la intensidad del campo eléctrico

A continuación se hará una descripción para posteriormente obtener la intensidad de un campo eléctrico, para esto hemos utilizado como referencia [1] más específicamente el capítulo 3 páginas 81 y 82.

La intensidad del campo eléctrico vendrá definido entre la relación del medio en el que se sitúe el campo eléctrico y el módulo del campo eléctrico al cuadrado ya que estaremos valorando dicha resistividad del medio ejercida al módulo de dicho campo eléctrico en cada una de sus componentes.

Para ello definiremos la expresión de campo eléctrico el cual tendrá relación con su polarización, esta será la forma general del mismo pero teniendo en cuenta los criterios

establecidos con anterioridad, ya que el resultado del campo eléctrico total se dará mediante la suma, (términos aditivos), de los campos tanto en la dirección x como en y siendo respectivamente cada una de estas E_x y E_y según la figura anteriormente expuesta.

Por lo tanto obtendremos que:

$$E(z, t) = E_x \vec{x} + E_y \vec{y} \quad (1)$$

Ambos términos variarán tanto de forma espacial como también presentarán una dependencia temporal.

Conociendo esto podemos expresar la intensidad del campo como una suma de la influencia del medio en cada potencia de cada componente, es decir:

$$I = \frac{|E_x|^2}{2\eta} + \frac{|E_y|^2}{2\eta} \quad (2)$$

Como podemos observar se tratará de la potencia media determinada por la exponencial de las componentes (individuales), entre dos y valoradas sobre el medio, cuya impedancia será de η por lo que realizando el factor común entre ambas partes obtendremos la siguiente forma de la expresión:

$$I = \frac{1}{2\eta} (|E_x|^2 + |E_y|^2) \quad (3)$$

Las polarizaciones anteriormente nombradas se han escogido en parte debido a que la polarización en estas depende intrínsecamente de ambas componentes tanto E_x como de E_y , por lo que obtendremos una expresión que satisfaga todos estos criterios:

$$1 = |E_x|^2 + |E_y|^2 \quad (4)$$

Podremos extraer de esta expresión tres conclusiones:

- La intensidad para dichos casos será igual al cuadrado de cada una de las componentes (componente x y componente y) constituyendo cada una, parte de su polarización.
- Obtendremos las polarizaciones a través de dicha expresión. La suma del valor absoluto al cuadrado dará la unidad y esta representará la intensidad total de la onda.

- En el caso de las expresiones finales de las distintas polarizaciones para que estas reglas de la intensidad tengan sentido, ya que tenemos que obtener una intensidad de '1' obligatoriamente, deberemos realizar el módulo al cuadrado para que no haya una resta no deseada en el cálculo de la potencia.

2.2 Polarización de las ondas planas

Para este apartado hemos utilizado los conocimientos plasmados en el libro [2], más específicamente en su capítulo 6.

Nosotros sabemos que cada uno de los términos podrán expresarse de la siguiente manera al tratarse de ondas planas:

$$\begin{aligned} E_x &= a_x \cos\left(\omega\left(t - \frac{z}{c}\right) + \varphi_x\right) \\ E_y &= a_y \cos\left(\omega\left(t - \frac{z}{c}\right) + \varphi_y\right) \end{aligned} \quad (5)$$

Tanto a_x como a_y son los valores máximos que pueden alcanzar los campos eléctricos, el coseno determinará el momento temporal y espacial en el que se situarán tanto los máximos como los mínimos del campo.

Observamos que para este tipo de ondas existe una periodicidad sujeta al espacio y al tiempo, el término de fase es el que produce que ambas componentes se encuentren en desfase una respecto a la otra.

Por lo tanto al sumar ambas expresiones al cuadrado obtendremos una solución resultante que será la base para todos los resultados posteriores con respecto a la polarización:

$$\frac{\varepsilon_x^2}{a_x^2} + \frac{\varepsilon_y^2}{a_y^2} - 2 \cos(\varphi) \frac{\varepsilon_x \varepsilon_y}{a_x a_y} = \text{sen}^2 \varphi \quad (6)$$

Siendo:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= E_x \\ \varepsilon_y &= E_y \end{aligned} \quad (7)$$

Estas ecuaciones nos permiten describir las polarizaciones y en concreto la ecuación que acabamos de obtener (polarización elíptica) y nos permitirá caracterizar cualquier tipo de polarización en un plano x-y.

El término φ se trata de la diferencia de fases entre x e y, dada por la siguiente ecuación:

$$\varphi = \varphi_y - \varphi_x \quad (8)$$

2.3 Polarización Lineal

En este apartado también estaremos utilizando los conocimientos de [2], así como de [5].

La polarización lineal como ya hemos definido anteriormente es uno de los casos específicos de la polarización elíptica. Podemos diferenciar entre tres tipos cada uno con sus características correspondientes.

2.3.1 Polarización lineal vertical

La polarización vertical se producirá cuando uno de los dos componentes que definen el plano sea nulo, por lo que según el criterio espacial que hemos establecido con anterioridad (*Figura 1.2*) la única contribución será de “y” en nuestro caso, ya que será componente vertical respecto al laser.

Sustituyendo en las expresiones (5) obtenemos:

$$\begin{aligned} E_x &= 0 \\ E_y &= a_y \cos\left[\omega\left(t - \frac{z}{c}\right) + \varphi_y\right] \end{aligned} \quad (9)$$

En este caso $a_x = 0$ y $a_y \neq 0$.

La expresión coseno no puede ser la que de igual a 0 porque para que sea vertical, E_x tiene que ser nula en todo el espacio-tiempo.

2.3.2 Polarización lineal horizontal

Se producirá de una forma similar a la polarización vertical salvo que a diferencia del anterior caso, esta vez el eje que se verá presente en la polarización será el “x” ya que será la componente horizontal respecto al laser. Según nuestra figura (*Figura 1.2*) estableceremos dicha dirección.

Sustituimos de la misma forma que en la polarización vertical y obtendremos en este caso el valor de $E_y = 0$ y E_x siendo invariante respecto a la expresión (5).

Por lo tanto $a_x \neq 0$ y $a_y = 0$.

2.3.3 Polarización planar

Se denomina polarización planar al caso específico en el que el desfase de ambos componentes del plano, en nuestro caso x e y sea 0 o π siendo la fase de la componente en x la referencia para la otra componente.

Sustituyendo en la ecuación (8), obtendremos los siguientes resultados:

Caso $\varphi = 0$:

$$\begin{aligned}\varphi &= \varphi_y - \varphi_x = 0 \\ \varphi_y &= \varphi_x\end{aligned}\quad (10)$$

Caso $\varphi = \pi$:

$$\begin{aligned}\varphi &= \varphi_y - \varphi_x = \pi \\ \varphi &= \varphi_y = -\varphi_x\end{aligned}\quad (11)$$

Sustituyendo en la ecuación general (6), obtendremos los siguientes resultados:

Caso $\varphi = 0$:

$$\begin{aligned}\frac{\varepsilon_x^2}{a_x^2} + \frac{\varepsilon_y^2}{a_y^2} - 2 \cos(0) \frac{\varepsilon_x \varepsilon_y}{a_x a_y} &= \sin^2 0 \\ \frac{\varepsilon_x^2}{a_x^2} + \frac{\varepsilon_y^2}{a_y^2} - 2 \frac{\varepsilon_x \varepsilon_y}{a_x a_y} &= 0 \\ \left(\frac{\varepsilon_x}{a_x} - \frac{\varepsilon_y}{a_y} \right)^2 &= 0 \\ \varepsilon_y &= \frac{a_y}{a_x} \varepsilon_x \\ \varepsilon_x a_y &= \varepsilon_y a_x\end{aligned}\quad (12)$$

Caso $\varphi = \pi$:

$$\begin{aligned}\frac{\varepsilon_x^2}{a_x^2} + \frac{\varepsilon_y^2}{a_y^2} - 2 \cos(\pi) \frac{\varepsilon_x \varepsilon_y}{a_x a_y} &= \sin^2 \pi \\ \frac{\varepsilon_x^2}{a_x^2} + \frac{\varepsilon_y^2}{a_y^2} + 2 \frac{\varepsilon_x \varepsilon_y}{a_x a_y} &= 0 \\ \left(\frac{\varepsilon_x}{a_x} + \frac{\varepsilon_y}{a_y} \right)^2 &= 0 \\ \varepsilon_x a_y &= -\varepsilon_y a_x \\ \varepsilon_y &= -\frac{a_y}{a_x} \varepsilon_x \\ |\varepsilon_x a_y| &= |\varepsilon_y a_x|\end{aligned}\quad (13)$$

Como podemos observar para estos casos únicamente dependerán de los campos x e y , al aumentar por ejemplo a_x , los términos a la derecha de la igualdad aumentarán y por lo tanto los términos a la izquierda obligatoriamente tendrán también que aumentar, en este caso específico, como ε_x depende de a_x este primer término incrementará proporcionalmente al segundo como bien se puede observar en la ecuación (13) y por lo tanto al haber aumentado su valor lo que estaremos haciendo es dar importancia y “peso” a dicha componente espacial por lo que la polarización planar tenderá más hacia la componente con mayor valor, gracias a esto podemos variar el ángulo que tiene el plano respecto al eje x que es la referencia de θ .

Ahora se propondrán unos ejemplos para comprobar la afirmación anterior, todas se darán con el primer caso, es decir, $\varphi = 0$ ya que el otro caso sería muy parecido.

- 1er caso: $x > y$

Para este caso tendremos una mayor aportación del campo eléctrico en la componente x que en y , debido a esto, la resultante total tenderá más hacia el eje x y por lo tanto el plano será más cercano a x formando un ángulo menor con respecto al eje de referencia (eje x):

$$\psi < 45^\circ$$

- 2º caso: $x < y$

Al presentar en este caso la componente y del campo eléctrico un mayor valor, hará que nuestro plano tienda hacia el eje vertical, por lo tanto formará un ángulo mayor con respecto al eje de referencia (eje y):

$$\psi > 45^\circ$$

- 3er caso: $x = y$

Al presentar el mismo campo eléctrico tanto en la componente x como en la componente y ocurrirá un caso específico, donde el ángulo que forma el plano con respecto la referencia será exactamente de 45° :

$$\psi = 45^\circ$$

2.4 Polarización Circular

Al igual que en el apartado anterior, estaremos utilizando los conocimientos de [2], así como de [5].

En el caso de la polarización circular tendremos dos casos distintos que cumplen ciertas similitudes, este es un caso específico de la polarización general definida anteriormente (6), donde el término φ será en nuestro caso de $\frac{\pi}{2}$ por lo tanto obtendremos la siguiente relación:

$$\varphi = \varphi_x - \varphi_y = \pm \frac{\pi}{2} \quad (14)$$

Con una expresión de relación de fases de:

$$\varphi_x = \varphi_y \pm \frac{\pi}{2} \quad (15)$$

El desfase en el caso de una polarización circular tiene que ser $\frac{\pi}{2}$ obligatoriamente, pero como ya hemos indicado con anterioridad, podremos tomar valores positivos y negativos del mismo. Este cambio en el signo variará la rotación de la propia onda, obteniendo para cada caso distintas características (respecto al sentido de rotación) y por lo tanto diferentes denominaciones.

2.4.1 Polarización circular levógira

Definimos a la polarización circular levógira como el caso de las polarizaciones circulares en la que existirá una dirección de giro a izquierdas, es decir, la onda girará de forma antihoraria desde su perspectiva. Este tipo de polarización circular se corresponderá al caso en el que $\varphi = -\frac{\pi}{2}$. Para que quede más claro utilizaremos la siguiente imagen:

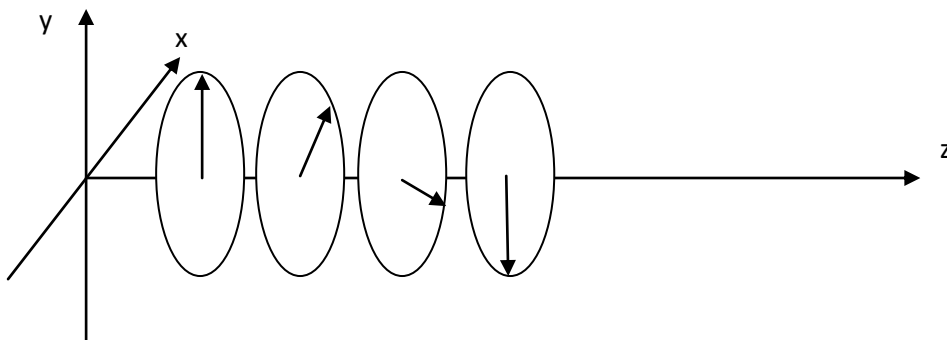


Figura 1.3 .Representación de una onda con polarización circular levógira (A izquierdas)

Como podemos observar la onda se propaga en nuestro espacio de izquierda a derecha, por lo tanto girará hacia el contrario de las agujas del reloj mientras realiza ese recorrido, (desde la perspectiva de la onda porque para la perspectiva del espectador situado en el eje z estrá girando de forma horaria).

2.4.2 Polarización circular dextrógira

Es el caso en el que la dirección de giro de la onda es a derechas, es decir, se produce de forma horaria desde su perspectiva.

Este tipo de polarización circular se corresponderá al caso en el que $\varphi = +\frac{\pi}{2}$. Representamos el caso para que quede más claro.

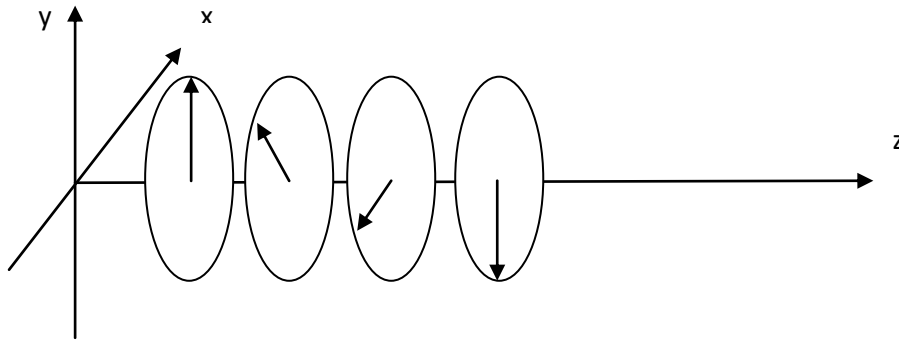


Figura 1.4. Representación de una onda con polarización circular dextrógira (A derechas)

Al igual que en el caso de onda circular levógira, dependiendo el punto de vista que estemos usando podemos decir que irá a favor o en contra las agujas del reloj, pero como ya he dicho, siempre tomaremos la perspectiva de la onda.

2.5 Matrices de las ondas

Este apartado tendrá referencias tanto teóricas como matriciales con respecto de [1] (Capítulo 3) como de [2] (Capítulo 6).

Ya habiendo definido las características físicas de la onda, y centrándonos en el objetivo de este trabajo necesitaremos caracterizar estos términos a un lenguaje matemático, esto es fundamental ya que necesitamos de herramientas capaces de modelizar cada uno de los comportamientos de la misma onda a estudiar.

En nuestro caso y como ya he mencionado anteriormente además de definir cada una de las polarizaciones de forma física utilizando ciertas expresiones que hemos obtenido gracias al estudio de los libros anteriormente mencionados, nos interesará trabajar con las polarizaciones, pero más aún con las intensidades ya que todo el trabajo anterior se ha hecho con el objetivo de obtener estas mismas.

El cálculo del comportamiento de las ondas podemos obtenerlo gracias a sus matrices asociadas, ahora pasaremos a definir que son y que funcionalidad y utilidad presentan así como sus características.

Las matrices de las ondas son un elemento matemático expresado de forma matricial, que caracteriza la polarización de la señal, que se propagará en una determinada dirección.

Centrándonos en el estudio de la onda, es fundamental para este método establecer un sistema de coordenadas. En nuestro caso será otra vez el ya ofrecido en la figura (Figura 1.2), siendo z el eje de propagación y las coordenadas xy siendo las que componen el plano de polarización.

Partiremos de la expresión (1), como bien sabemos, esta se podrá expresar de la siguiente forma:

$$E = a_x e^{j\varphi_x} \hat{x} + a_y e^{j\varphi_y} \hat{y} \quad (16)$$

Separaremos cada uno de los términos (x e y), con el objetivo de formar una matriz de dimensiones (2x1), es decir, dos filas y una columna. Por lo tanto obtendremos la siguiente matriz general para la caracterización de cualquier onda polarizada:

$$J = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x e^{j\varphi_x} \\ a_y e^{j\varphi_y} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Ya conociendo la matriz general, podremos obtener las matrices específicas asociadas a los casos que habíamos definido anteriormente, justificando el cómo y el porqué hemos realizado dichos cambios.

2.5.1 Polarización lineal vertical

Como ya hemos dicho anteriormente para el caso en el que $a_x = 0$, la parte superior de la matriz valdrá 0. El valor de φ_y es 0, ya que estará centrado en el eje y ergo no presentará inclinación (ángulo) alguno, debido a que todo el campo eléctrico está concentrado en dicho eje, la forma normalizada de su amplitud será $a_y = 1$, por lo tanto obtendremos la siguiente expresión:

$$J = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 * e^{j0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

2.5.2 Polarización lineal horizontal

Sucede de la misma forma que en el caso anterior, pero en este caso todo el campo eléctrico se centra en el eje x ($a_x = 1$), por lo que la parte inferior de la matriz valdrá 0. El valor de φ_x es 0 ya que estará alineado con x y por lo tanto el ángulo formado con este eje es nulo.

$$J = \begin{bmatrix} 1 * e^{j0} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

2.5.3 Polarización planar (Ángulo respecto a los ejes)

Como ya hemos dicho tomaremos el ángulo que se genera con el eje x como la referencia para crear la matriz de Jones en estos casos, podemos saber que representan cada uno de los componentes de manera gráfica.

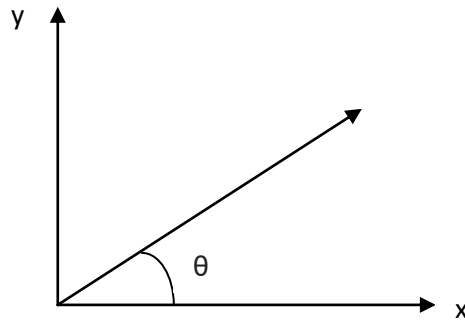


Figura 1.5 .Representación del ángulo θ respecto a la coordenada x

Para este ángulo cada eje representa uno de los catetos que lo forman. Para verlo de mejor manera haremos el paralelo de la coordenada y, enfrentándolo al ángulo.

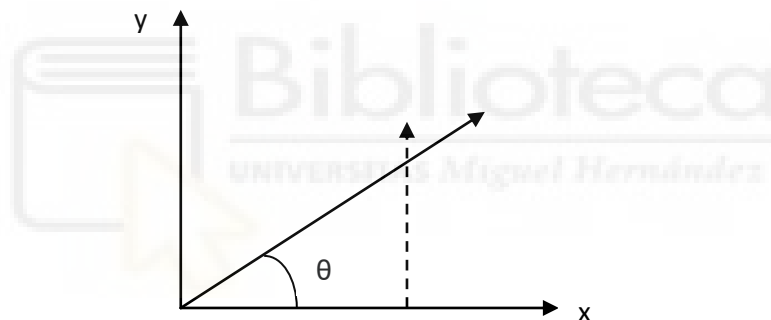


Figura 1.6 .Traslación del eje y sobre el eje x (Obtención del cateto opuesto)

Por lo tanto el eje y, formará con la hipotenusa (que sería la resultante de la onda) el $\text{Seno}(\theta)$, mientras que el cateto contiguo o lo que es lo mismo (x), formará el $\text{Coseno}(\theta)$.

Después de haber deducido esto, lo introducimos directamente a la Matriz de Jones de la siguiente forma:

$$J = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \text{sen}(\theta) \end{bmatrix} \quad (20)$$

2.5.4 Polarización Circular:

Ahora analizaremos tanto la polarización levógira como la dextrógira.

2.5.4.1 Polarización levógira

Utilizaremos la expresión (16) por lo tanto partiremos de una expresión en amplitud y fase de los componentes del campo eléctrico, como ya hemos numerado todas las características de la onda circular levógira o a izquierdas, vamos a repararlas para poder obtener su expresión en matrices de Jones:

$$- A_x = A_y \quad (21)$$

Esto se produce debido a que es una polarización circular y por lo tanto las componentes x e y presentarán la misma amplitud.

$$- \varphi = \varphi_x - \varphi_y = \frac{\pi}{2} \quad (22)$$

Como ya hemos visto en la ecuación (14), sabemos que el eje x se tomará como referencia, mientras que φ_y estará desfasado de forma ortogonal, por lo que obtendremos los siguientes resultados:

$$\begin{aligned} \varphi_x &= 0 \\ \varphi_y &= -\frac{\pi}{2} \end{aligned} \quad (23)$$

El signo de la fase en y (φ_y), hará referencia a que en este caso su polarización es levógira ya que gira en contra de las agujas del reloj según la perspectiva de la onda, esto implica un ajuste negativo a dicha fase.

Por lo tanto la expresión de campo eléctrico anterior y con los datos que acabamos de introducir, obtendremos la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} E &= a_x \hat{x} + a_x e^{-j\frac{\pi}{2}} \hat{y} \\ E &= a_x (\hat{x} + e^{-j\frac{\pi}{2}} \hat{y}) \end{aligned} \quad (24)$$

Como la intensidad total se distribuirá tanto en la componente en x como en y, obtendremos por lo tanto una expresión normalizada siendo 1 la intensidad global y cada uno de los dos componentes dependientes de la misma, es decir, la suma aditiva de su módulo al cuadrado será igual a 1.

Como bien he explicado antes al ser intensidad del campo eléctrico, esta suma procederá a ser al cuadrado, por lo que obtendremos la siguiente expresión:

$$|A_x|^2 + |A_y|^2 = 1 \quad (25)$$

Como bien sabemos, ambas amplitudes son las mismas debido a que estamos trabajando con ondas circularmente polarizadas.

Por lo tanto despejando A_x , obtendremos la amplitud de ambas componentes de la onda:

$$\begin{aligned} 2|A_x|^2 &= 1 \\ A_x &= \frac{1}{\sqrt{2}} \end{aligned} \quad (26)$$

Ahora introduciremos esta amplitud en la expresión introducida anteriormente:

$$E = \frac{1}{\sqrt{2}}(\hat{x} + e^{-j\frac{\pi}{2}}\hat{y}) \quad (27)$$

Centrándonos en la fase de y , introducimos la expresión general de una exponencial de este tipo separándolo en parte real, (coseno), y en parte imaginaria (seno):

$$\begin{aligned} e^{-j\frac{\pi}{2}} &= \cos\frac{\pi}{2} + j\sin\frac{\pi}{2} \\ e^{-j\frac{\pi}{2}} &= 0 - j \\ e^{-j\frac{\pi}{2}} &= -j \end{aligned} \quad (28)$$

Sustituyendo por última vez en la expresión de campo eléctrico (27) por tanto obtendremos que:

$$E = \frac{1}{\sqrt{2}}(\hat{x} - j\hat{y}) \quad (29)$$

Haciendo la separación o distinción de las matrices de las ondas, obtendremos por lo tanto la siguiente matriz:

$$LCP = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix} \quad (30)$$

2.5.4.2 Polarización dextrógira

La matriz que define a esta polarización se elaborará de la misma forma que para el caso de la polarización levógira, pero con distintos valores de las componentes de la ecuación (24) definida anteriormente, esto se debe a que en vez de ser una polarización circular con sentido de giro antihorario pasará a tener un sentido de giro horario, y por lo tanto el desfase de la componente y (φ_y) que hemos mencionado anteriormente variará.

Las características comunes serán las siguientes:

- $a_x = a_y$

$$|A_x|^2 + |A_y|^2 = 1 \quad (31)$$

$$A_x = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$E = \frac{1}{\sqrt{2}}(e^{j\varphi_x}\hat{x} + e^{j\varphi_y}\hat{y})$$

Como hemos dicho, existirá ahora una variación con respecto a la polarización circular levógira, esto es debido a la fase de y (φ_y). Como anteriormente hemos mencionado, el desfase que se producirá en el caso actual entre ambas componentes será de $\frac{\pi}{2}$ en su forma positiva, obteniendo la siguiente igualdad:

$$\varphi_y = \frac{\pi}{2} \quad (32)$$

Conociendo que φ_x no experimenta ninguna variación debido a que esta siempre será la referencia, mientras que φ_y presentará el valor anteriormente asignado, podemos obtener la expresión general:

$$E = \frac{1}{\sqrt{2}}(\hat{x} + e^{j\frac{\pi}{2}}\hat{y})$$

$$e^{j\frac{\pi}{2}} = \cos \frac{\pi}{2} + j \sin \frac{\pi}{2} \quad (33)$$

$$E = \frac{1}{\sqrt{2}}(\hat{x} + j\hat{y})$$

Ordenándolo de la misma forma que lo hemos hecho en el caso circular levógiro obtendremos la siguiente matriz:

$$RCP = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix} \quad (34)$$

Ya habiendo definido todos estos casos, ahora se mostrará una tabla para que esté todo más ordenado y nos sea más fácil y cómodo utilizar o consultar dichas polarizaciones:

Polarizaciones y matrices de ondas asociadas	
P.Lineal vertical	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$
P.Lineal horizontal	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$
P.Planar	$\begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix}$
P.Circular levógira	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix}$
P.Circular dextrógira	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix}$

Tabla 1.1. Ejemplos de polarizaciones de una onda plana y sus matrices de ondas asociadas

Como podemos observar en la tabla, hemos obtenido cada una de las expresiones que nos interesan para cada caso señalado. Mi intensidad por lo tanto para todo este tipo de ondas sería el cuadrado de cada uno de los componentes, esto se puede demostrar fácilmente gracias a que la suma de cada componente al cuadrado es '1' (valor normalizado de la intensidad):

Caso Polarización lineal:

Es global para los dos ya que solo se invierte el 0 por el 1, obteniendo por lo tanto la siguiente expresión:

$$0^2 + 1^2 = 1$$

Caso Polarización planar:

La polarización planar tiene desde su premisa, una relación con dicho planteamiento anteriormente forulado (de que la intensidad es igual a 1 contando con ambas componentes) gracias a las funciones trigonométricas podemos obtener la siguiente expresión que verifica lo anteriormente afirmado:

$$\cos^2(\theta) + \sin^2(\theta) = 1 \quad (35)$$

Al tratarse de una función trigonométrica, tendrá que cumplirse para cualquier valor del ángulo (θ).

Como sabemos, para un caso en el que el seno sea igual a uno, el coseno será igual a cero y viceversa, al cada uno no poder sobrepasar la unidad también podremos confirmar la siguiente expresión:

$$\cos(\theta) = \sqrt{1 - \sin^2(\theta)} \leq |1| \quad (36)$$

No solamente eso, sino que para valores intermedios de la theta, variará de tal forma que independientemente del valor de θ , siempre obtendremos la unidad si hacemos uso de esta expresión.

P.Circular levógira:

Aplicando de nuevo la suma de los cuadrados de los dos términos, vamos a probar si esta premisa teórica es cierta, donde:

$$\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{-j}{\sqrt{2}}\right)^2 \quad (37)$$

Ahora igualaremos a 1, por lo que despejaremos en dicha ecuación:

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$$

Como podemos observar la suma de ambas componentes (x e y) de la polarización circular, será igual a 1, ya que toda la intensidad estará contenida en dichos ejes.

P.Circular dextrógira:

Se realizará de la misma forma que la levógira, es decir elevaremos al cuadrado la expresión asociada a la polarización circular dextrógira.

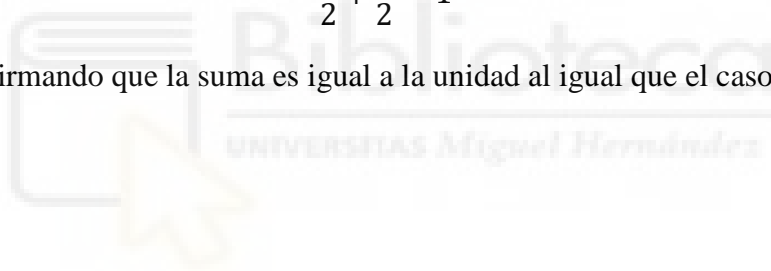
Obtendremos por lo tanto la siguiente expresión:

$$\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{j}{\sqrt{2}}\right)^2 = 1 \quad (38)$$

Despejaremos la expresión como lo hemos hecho anteriormente:

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$$

También confirmando que la suma es igual a la unidad al igual que el caso anterior.



3. Estudio de la cavidad láser

Como bien hemos dicho anteriormente, una cavidad láser es una región del espacio que quedará delimitada por al menos dos elementos reflexivos o espejos. En la cavidad resonante resultante se conseguirá la oscilación láser a partir de la realimentación de la emisión coherente que resulta tras el bombeo del medio de ganancia (cristal láser) con una fuente energética exterior (óptica o eléctrica). La cavidad podrá albergar en su interior diferentes elementos ópticos que modificarán las características de la onda u oscilación láser generada y en particular, el estado de polarización en el caso que nos ocupa. Dichos elementos intermedios presentarán cierta distribución espacial por la que pasará la onda, produciéndose así una interacción con dichos objetos de la cavidad que producirán variaciones en las características de la señal generada.

La importancia de estos elementos, es que gracias a ellos podemos obtener características que nosotros podremos desear en el caso de que los manipulemos para que cumplan dichos propósitos, pero, también pueden alterar de una forma desconocida el láser que estemos utilizando, ciertas características que pueden ser modificadas son las siguientes:

- Dirección de la onda
- Sentido de la onda
- Amplitud de la onda
- Polarización de la onda

Por lo que podemos observar, estos elementos son importantes y las variaciones citadas pueden afectar mucho a lo que llegue a un receptor óptico real.

Hay que mencionar que hay cierta variedad en los elementos que nosotros podemos utilizar para alterar el laser que estemos utilizando, por lo tanto cada uno podrá presentar ciertas características únicas que nos garanticen ciertos comportamientos, en nuestro caso y con el fin mismo de nuestro TFG, lo importante será al menos plantear una distinción entre elementos que varíen la polarización y los que no.

- Elementos varían la polarización
 - Polarizadores
 - Rotadores de polarización
 - Divisores y combinadores de polarización
 - Retardadores de onda
- Elementos no varían la polarización
 - Espejos

El análisis de cada uno de estos se hará del elemento más sencillo de caracterizar (Polarizadores x o y) hasta los elementos más complejos que puede presentar la cavidad así como sus distintos casos (Rotadores de onda).

3.1 Matrices de Jones y su importancia en las cavidades

Las matrices de Jones serán un recurso que utilizaremos para caracterizar los distintos elementos ópticos que componen a una cavidad.

A parte de analizar el comportamiento individual de los distintos elementos que componen la cavidad, también queremos estudiar las variaciones que ejerce este espacio sobre la polarización de una señal propagante (al final es uno de los objetivos principales del trabajo), además de obtener todos estos cálculos de una manera matemática e intuitiva.

La cavidad es definible y espacialmente finita gracias a los límites que establece cierto elemento que ya hemos mencionado (espejos), dicho elemento confinará el haz en las dimensiones establecidas creando por lo tanto un entorno semicerrado.

Definida la cavidad y los elementos que la componen, existirá en esta misma una variación tanto del tipo de elementos como en su número.

Con respecto a la variación de los distintos elementos dentro de la misma, definiremos aquellos que causen un estado distinto a la polarización de entrada o en el caso de los espejos, cambios de orientación o de amplitud, tendremos que tener en cuenta las pérdidas por reflexión u otros comportamientos que presenten los distintos elementos.

Hay que mencionar que no es igual el comportamiento que puede tomar la cavidad con un número u otro de objetos ópticos y aunque no lo contemplemos en este trabajo, ya que trabajamos en torno a las polarizaciones, pueden presentarse grandes pérdidas ya sea por reflexiones o por numerosas absorciones de los distintos elementos.

Lo anteriormente expuesto nos puede dar una idea de que los elementos que presentan las cavidades influyen enormemente a la misma y por ello nos interesará estudiar el comportamiento en cada punto de su espacio, es decir, cada vez que empieza o termina un elemento dentro de dicha cavidad.

3.1.1 Matriz round-trip

Para poder ejercer un estudio adecuado de estas cavidades necesitaremos realizar o mejor dicho, obtener la matriz de round-trip, en castellano podríamos definirla como “matriz de circulación completa”, esta es formada mediante el producto de las distintas matrices de las que depende nuestro sistema. El modo en el que crearemos la matriz será realizando el producto de matrices empezando desde un elemento óptico situado de forma inmediata al punto que queremos estudiar en la cavidad hasta llegar al elemento que delimita este espacio (espejo de salida o el espejo de entrada de la cavidad), después multiplicaremos las matrices en la dirección opuesta a la que estábamos recorriendo, hasta llegar al otro elemento que delimite la cavidad. Por último cambiaremos de nuevo el sentido hasta llegar al punto desde el cual hemos comenzado.

Esto anteriormente analizado se puede expresar de una forma más resumida y es que la matriz round-trip no es más que el resultado de un recorrido que se realiza desde un punto específico de la cavidad hasta que vuelva a pasar por dicho punto habiendo multiplicado por lo menos una vez a los elementos en los extremos de nuestro espacio.

Ya que estábamos hablando de los distintos elementos de la cavidad y para hacernos una idea de cómo operamos con esta nueva matriz de round-trip tendremos primero que definir las dimensiones que presentan las matrices intermedias de cada uno de los elementos ópticos contenidos en este espacio.

Las dimensiones de las matrices que componen la matriz round-trip de la cavidad, es decir, las dimensiones de las matrices de Jones, son distintas a las matrices de las ondas que hemos estudiado anteriormente, ya que para una onda incidente al pasar por cierto elemento, tendrá que formar a su salida una onda definible en el espacio x-y. Conociendo el proceso del producto matricial de una cavidad sabemos que presentarán un formato de filas x columnas, por lo que conociendo las dimensiones de las matrices de las ondas (2 filas y 1 columna) tanto a la entrada como a la salida de la cavidad, deduciremos el tamaño de las matrices intermedias:

$$\begin{bmatrix} OT_{11} \\ OT_{21} \end{bmatrix} = [DIM\ Elem/Cavidad] \begin{bmatrix} OI_{11} \\ OI_{21} \end{bmatrix} \quad (39)$$

Como podemos observar, las matrices de las ondas recibidas por nuestro receptor óptico presentan las mismas dimensiones que las señales bombeadas a la cavidad, estas últimas se introducirán a la derecha ya que el orden de operación en nuestro caso especificará que el nuevo elemento por el que “pase” el laser se introducirá a la izquierda del producto mientras que el cúmulo de productos anteriores estará a la derecha. Por su parte la matriz de un elemento o directamente la de la cavidad será la que conserve dichas dimensiones definidas por la onda, por lo tanto y dicho lo anterior, las matrices que estudiaremos en este apartado son de dimensión 2x2, y presentarán la siguiente estructura:

$$M_{Jones} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (40)$$

Es destacable mencionar que los componentes M_{11} y M_{22} corresponden respectivamente a las componentes x e y de forma pura, es decir, cualquier parte de la matriz que no se sitúe en esta diagonal (su opuesta) será una amalgama entre ambos componentes, por lo que dependerán tanto de x como de y.

Esto es muy importante ya que muchos elementos de la cavidad variarán solo una coordenada u eje del espacio sobre la onda incidente, otros por su parte variarán los dos y otros al tener valores en ambas diagonales estarán teniendo en cuenta todos los elementos de la matriz y por lo tanto la onda resultante, que como ya hemos dicho,

presenta la componente x en su parte superior y la componente y en la parte inferior, estará compuesta por ambas coordenadas de la onda incidente.

La siguiente estructura nos dará una idea de lo que estoy diciendo, ya que tendremos una onda incidente al elemento representado como (I), una onda que saldrá a la que le denominaremos (S) y una matriz que representa al elemento intermedio (M), presentando la siguiente estructura basada en la anterior ecuación (39):

$$\begin{bmatrix} S_x \\ S_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_x \\ I_y \end{bmatrix} \quad (41)$$

Por lo tanto los valores S_x y S_y que obtendríamos serían los siguientes:

$$\begin{aligned} S_x &= M_{11}I_x + M_{12}I_y \\ S_y &= M_{21}I_x + M_{22}I_y \end{aligned} \quad (42)$$

Como podemos observar la componente x de la salida, presenta tanto componente en x como en y de la onda incidente, lo mismo ocurrirá con la componente y, por lo que cuando tengamos M_{12} como valor distinto a 0, la polarización en la coordenada x a la salida (S_x) estará compuesta por ambas coordenadas de la onda incidente mientras que en el caso en el que M_{21} no sea nula, presentará el mismo caso pero para la coordenada y (S_y).

Para completar los siguientes apartados utilizaremos los conocimientos obtenidos a partir de [1], [2] y [6], esto es debido a que ahora empezaremos a definir los distintos elementos ópticos de la cavidad y en estas referencias se explicará todo lo referente tanto al comportamiento de estos como a la obtención de matrices de Jones asociadas.

3.2 Estudio de los Polarizadores

Como bien hemos identificado y clasificado anteriormente, los polarizadores se tratarán de elementos que variarán la polarización respecto a la onda incidente, estos se situarán dentro de la cavidad y tendrán como único objetivo el modificar esta característica de la señal.

Por lo tanto y habiendo esclarecido exactamente su función, podemos decir que a pesar de la polarización de la onda en la entrada, el polarizador podrá modificarla de distintas maneras. Las dos formas más sencillas de polarizadores serán aquellos que polaricen la onda en cualquiera de los dos ejes (xy), por lo que las ondas tomarán un valor linealmente polarizado en x o en y a la salida de dicho elemento.

El siguiente dibujo podrá ofrecer de una manera visual el comportamiento de un polarizador que solo deje pasar las componentes en x, habiendo una onda incidente cuyos ejes forman una elipse. Representamos el caso propuesto:

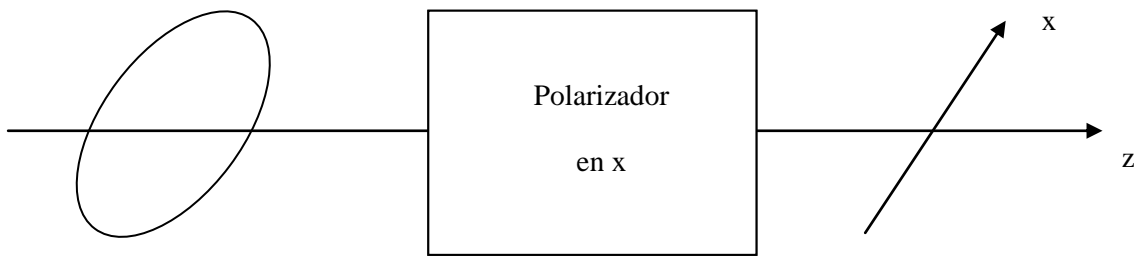


Figura 3.1. Polarizador de la onda en el eje x

Como podemos observar a la entrada se situaría una onda elípticamente polarizada, como bien sabemos, este tipo de polarización presentará tanto componente en x como componente en y, en este caso al no presentar la misma intensidad formarán una elipse. Al cruzar el polarizador en x, que se situará en la dirección del laser, es decir, el eje z, obtendremos a la salida únicamente la componente x del laser, por lo que podremos decir que ha eliminado cualquier rastro de la componente en y.

El caso anterior nos da una buena idea de cómo funciona este tipo de polarizadores sobre un eje, ya que por ejemplo para el caso de un polarizador en y, haría el proceso contrario, es decir, eliminaría las componentes de x de la onda y en cambio solo mostrará a la salida de dicho elemento las componentes en y.

Claro, todos estos ejemplos se deben a que la polarización incidente es elíptica y presentan ambas componentes (como inciso cabría destacar que la polarización circular se comportaría como la elíptica pero con el mismo valor para ambas componentes del espacio), por lo que ahora plantearíamos el caso de una onda linealmente polarizada en x que incida a un polarizador en y para ver sus consecuencias:

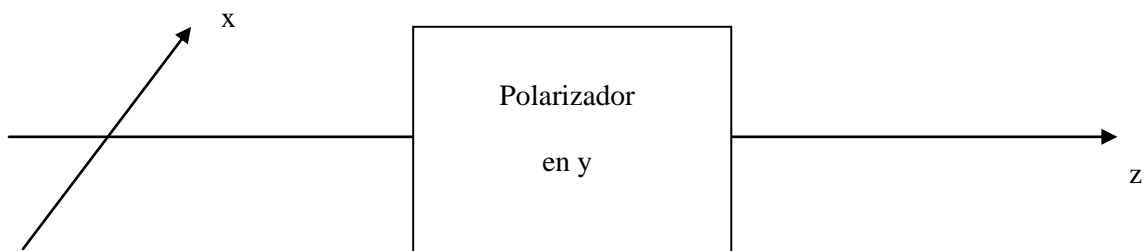


Figura 3.2. Polarización perpendicular de una onda incidente con componente x

Habría que hacer un inciso y es que dicho resultado sería el mismo para el caso en el que la onda incidente fuera y, mientras que el polarizador, esta vez solo dejase transmitir la coordenada x (Polarizador en x), por lo que y, al igual que en el caso representado, la señal sería eliminada totalmente ya que no presenta la polarización

exigida por este elemento y por lo tanto será descartada ya que será totalmente absorbida por el mismo polarizador.

Obteniendo por lo tanto para las matrices de Jones las siguientes expresiones:

Polarizador en x:

$$P_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (43)$$

Polarizador en y:

$$P_y = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (44)$$

El uso de estos elementos cuando el polarizador sea sobre cualquiera de los dos ejes en una cavidad en el que no sabremos el comportamiento de la onda “a priori” es contraproducente, ya que podría eliminar toda la onda en el caso de que la polarización fuera perpendicular a dicho polarizador, de todas formas nos garantiza de que la onda sea vertical u horizontal, eso sí, en el caso de que no esté la misma perfectamente alineada con el eje correspondiente al polarizador podremos afirmar que disminuirá la potencia de la señal debido a que parte se irá junto a la componente absorbida.

Ya definidos los casos más básicos de los polarizadores, pasaremos a analizar el comportamiento general que estará definido para cualquier dirección del espacio x-y, este dependerá por lo tanto del ángulo que tomará sobre el eje x, a lo que hemos definido anteriormente como ángulo θ de la onda (punto anterior), este tipo de polarizadores actuarían de la siguiente manera con la onda:

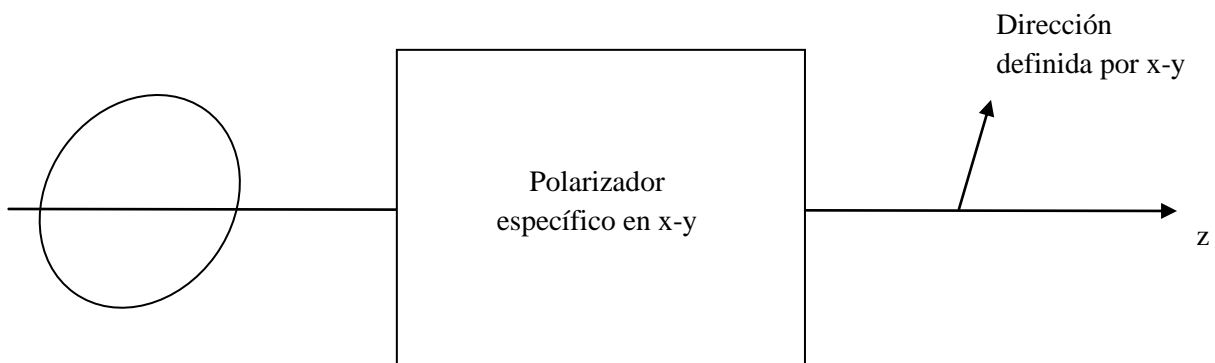


Figura 3.3 .Polarizador genérico con componentes x-y

Como podemos observar solo habrá seleccionado una polarización lineal asociada a esa polarización circular, pero el resultado no estará ni centrado en x ni en y sino que estará en una dirección distinta, para verlo mejor podremos dibujarla sobre este plano:

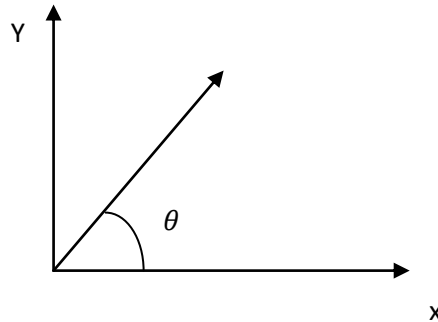


Figura 3.4 .Representación bidimensional de la polarización a la salida

Obteniendo la siguiente expresión general del polarizador:

$$M_{\text{polarizador}} \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \text{sen } \theta \cos \theta \\ \text{sen } \theta \cos \theta & \text{sen}^2 \theta \end{bmatrix} \quad (45)$$

Tanto M_{12} como M_{21} serán iguales en la matriz descrita anteriormente, esto se debe a que tendremos en cuenta la presencia de las dos coordenadas tanto en la componente x como la y de la matriz de entrada en la matriz que describe la polarización a la salida del polarizador. Obteniendo así el producto seno x coseno.

Ahora bien, habiendo definido todas las características de los polarizadores, y como actúan frente a una matriz incidente cualquiera, lo que debemos de ver es como se crea un polarizador, y como actúan para obtener los comportamientos que deseamos en su salida.

La respuesta a esta pregunta no es única, los polarizadores se tratan de elementos que pueden obtenerse de diferentes maneras y presentarán formas de funcionamiento distintas para obtener las polarizaciones deseadas.

3.2.1 Absorción o pérdidas selectivas

El primer método que analizaremos para la creación de polarizadores es el de la absorción o pérdidas selectivas, donde dependiendo del material que escojamos podremos ver que ciertas componentes de una onda se ven absorbidas, cuando pasan por dicho medio, mientras que las componentes ortogonales se mantienen, es decir, serán las que obtengamos a la salida del polarizador.

Aunque obtengamos una señal a la salida del polarizador es posible que debido a distintas pérdidas (no sea un polarizador perfecto, absorciones, etc.), no obtengamos el resultado que en principio debería captar el receptor.

Este tipo de polarizadores en específico utilizaran materiales dicroicos, como definición podemos decir que este tipo de materiales presentan distintas absorciones (o pérdidas) dependiendo del tipo de polarización, por lo que en ciertos casos su transmisión será mejor que en otros.

3.2.2 Reflexión selectiva en materiales isotrópicos

Un material isotrópico es aquel que presenta una característica común, es decir, cada una de sus componentes se comporta de la misma manera frente a la luz, por lo que cuando la onda atraviesa dicho elemento, no se verá afectada de forma distinta dependiendo de la componente que estemos analizando.

Para obtener el tipo de polarización que queremos de la señal introducida, necesitaremos realizar distintos tipos de reflexiones que consigan aislar esas componentes no deseadas y quedarnos finalmente con la que nos interese estudiar, para ello la reflexión de la componente indeseada debe de ser total mientras que la que queremos obtener será transmitida.

Para poder obtener lo anterior necesitaremos incidir de una forma específica el rayo, teniendo en cuenta ciertos parámetros espaciales, pero debido a que este tipo de polarizaciones estarán más enfocadas a fibra, no nos interesará en nuestro caso, también recalcar que no se utilizan con frecuencia. Habrá un recurso parecido que se explicará posteriormente y sí que estará más enfocado en nuestro trabajo.

3.2.3 Materiales Birrefringentes

Estos se utilizan en fibras, confinando la parte del rayo que nos interesa y transmitiendo al medio libre lo que no necesitamos, dicho comportamiento es debido a la propiedad básica de los elementos birrefringentes.

La definición de elemento birrefringente estará más abajo en este documento, ya que este, sin duda, será uno de los ejes fundamentales sobre el que irá este trabajo fin de grado y por lo tanto solo lo introduciremos, ya que en este tipo de apartados secundarios solo estamos realizando una breve descripción de uno de los tipos de polarizadores.

3.3 Rotadores de la polarización

En este caso a diferencia del elemento anterior (polarizadores) se alterará otra variable de la onda, la característica en cuestión será el ángulo que formará la polarización de la onda con el eje x, es decir, modificaremos el ángulo θ que presentan las polarizaciones.

Por lo que el resultado obtenido a la salida de un rotador será el producido de la suma entre el ángulo que presentaba la onda a la incidencia de este material y el ángulo proporcionado por el Rotador, formando el siguiente ángulo de salida:

$$\begin{aligned}\theta_2 &= \theta_1 + \theta \\ \theta &= \theta_2 - \theta_1\end{aligned}\tag{46}$$

Para caracterizar la onda que utilizará dicho rotador se trabajará con la segunda expresión por la cual hemos obtenido su ángulo de rotación respecto a x.

Ahora examinaremos gráficamente el efecto de una onda entrante que pasará por un rotador de polarización. Para esta realización se utilizará un caso en el que la onda incidente tenga cierta theta, es decir, cada componente tiene cierto desfase respecto a la coordenada en x, por lo que de manera general y teniendo en cuenta la figura (Figura 3.4), existirá una relación entre coseno de dicho ángulo, este será correspondiente a x y el seno de dicho ángulo que en este caso será correspondiente a y, formando la siguiente matriz de la onda:

$$M_{Incid} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 \end{bmatrix} \quad (47)$$

Para ser exactos, la expresión global utilizada para estos elementos será la siguiente:

$$M_{Rotador} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (48)$$

Ahora haremos una representación gráfica de un ejemplo general para que todo esto nos quede más claro:

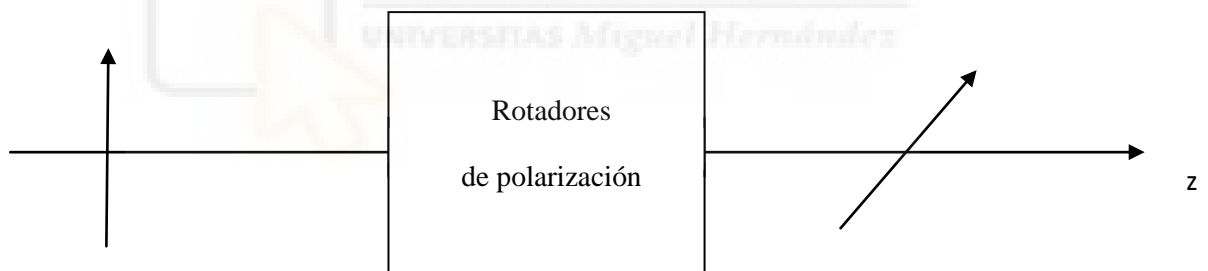


Figura 3.5 .Rotador de la onda incidente en un ángulo θ

Vemos la rotación de la onda después de pasar por el rotador, la utilidad de estos elementos es clara y es que conociendo la polarización de entrada y al no ser esta la adecuada para mí como espectador, puedo llegar a cambiarla y hacer que el láser presente la polarización deseada girándola.

Representamos de forma bidimensional el cambio que se realiza en la entrada y la salida:

- Polarización de entrada:

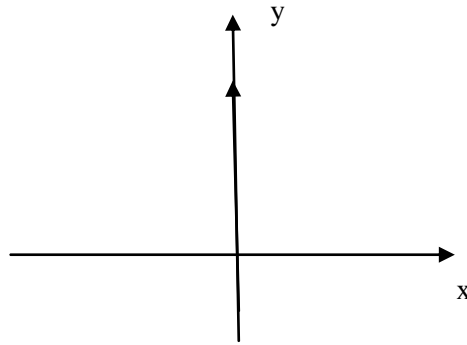


Figura 3.6. Representación bidimensional de la polarización a la entrada

- Polarización de salida:

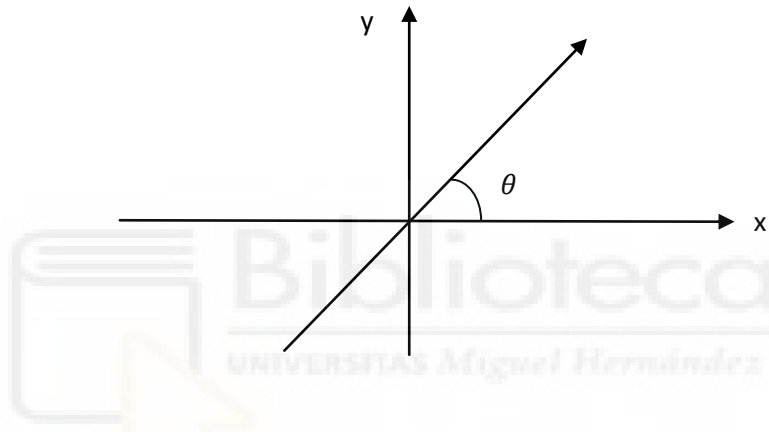


Figura 3.7. Representación bidimensional de la polarización tras el rotador de la polarización

Hemos visto que nuestra polarización ejerce una rotación respecto a la entrada. El elemento lo que ha hecho ha sido variar desde una polarización lineal en el eje y a una que depende tanto en x como en y.

Utilizando la matriz (47) obtendremos:

$$M_{Entrada} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (49)$$

Esto se debe a que la matriz asociada a la onda de entrada, presenta únicamente una componente en y (siendo x nula).

Ahora definiremos la matriz asociada a la onda formada después del rotador (Onda de salida):

$$M_{Salida} = \begin{bmatrix} S_x \\ S_y \end{bmatrix} \quad (50)$$

Al no conocer el ángulo respecto a x, obtendremos una expresión genérica dependiente de dicha inclinación, por lo que tendremos la siguiente ecuación producto de la matriz a la entrada (49) y un rotador, obteniendo por lo tanto la siguiente matriz:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} S_x \\ S_y \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} S_x \\ S_y \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (51)$$

Vemos que existe un cambio en la salida, al solo tener una componente (y) en la entrada, realmente, la componente x a la salida estará compuesta por dicha componente de la onda incidente.

Por lo tanto la onda a la salida tendrá la misma intensidad o potencia que a la entrada (a diferencia del caso anterior), debido a que ninguna de sus componentes es eliminada y este medio tampoco atenúa la onda en cuestión (al menos así es como lo hemos supuesto).

3.4 Divisores y combinadores de la polarización

Como hemos visto en casos anteriores hemos podido cambiar la polarización de distintas maneras, estas siempre partían de una onda incidente al que las modificaciones siempre daban lugar a una única polarización, es decir, onda introducida daba lugar a onda de salida o transferida por el elemento, en este caso será distinto.

En este apartado se analizarán de una forma breve los distintos tipos de divisores, cabe mencionar que estos mismos pueden trabajar como combinadores de las señales dependiendo de cómo incidan las ondas en estos elementos.

Hay que mencionar que en este caso no se analizarán de manera matricial por las matrices de Jones, debido a que no nos interesará para nuestro cometido, ya que nosotros siempre trabajaremos en esta cavidad con una única onda y no tendremos la necesidad de utilizar varios tipos de señales, tampoco inyectamos con distintos láseres a la vez sobre la cavidad (caso de combinadores), este estudio nos interesará ya que en otros casos podremos darle una utilidad y analizar de manera separada o conjunta los distintos tipos de polarizaciones a la salida.

Siguiendo con nuestro tema de interés, los divisores de polarización permiten a partir de una onda descomponer sus componentes para que de un tipo de polarización obtengamos dos distintas a la original.

Este concepto es muy curioso ya que podremos tatar ambas de distinta forma ya que podremos separarlas espacialmente, esto con el objetivo de estudiarlas por separado.

Ahora vamos a analizar los distintos tipos de elementos que permiten dicha división y un ejemplo gráfico de cada uno de ellos para que podamos visualmente tenerlo todo mucho más claro.

3.4.1 División y combinación con prismas

3.4.1.1 Prisma de Rochon

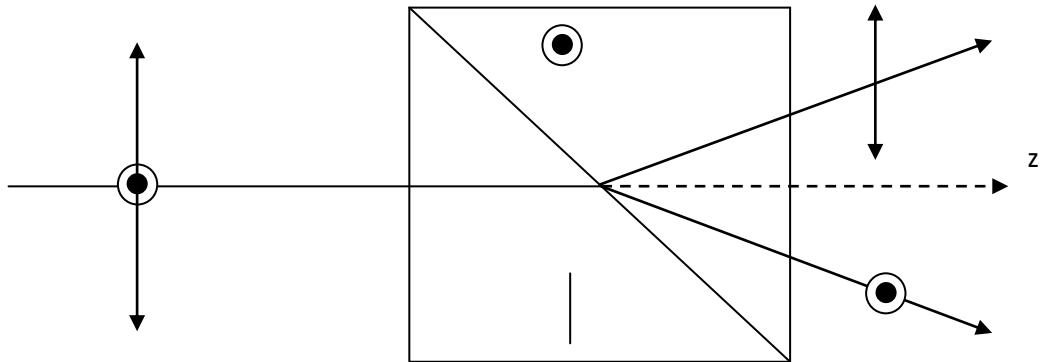


Figura 3.8. División de la polarización de la onda por un prisma de Rochon

3.4.1.2 Prisma Glan - Thompson

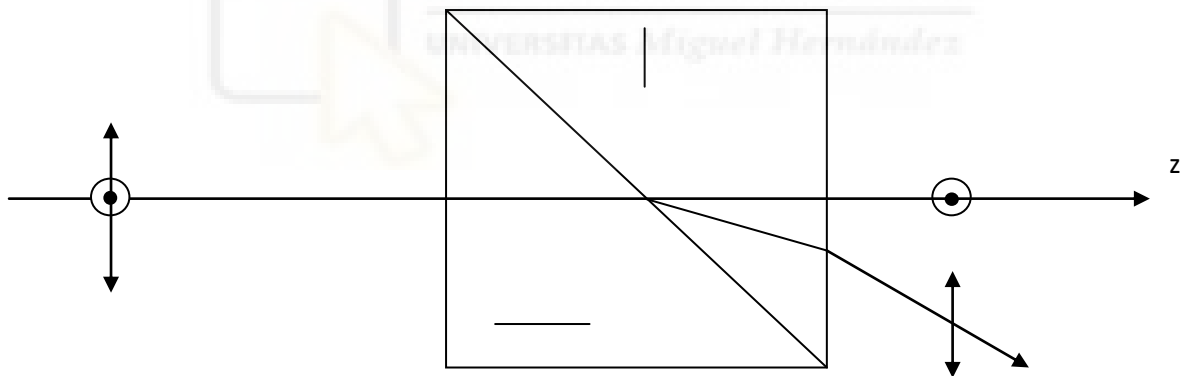


Figura 3.9. División de la polarización de la onda por un prisma de Glan - Thompson

Una de las grandes diferencias de cada uno de estos es que el primero, con una incidencia normal, provocará que las polarizaciones resultantes de esta, sean divididas cada una en una dirección distinta y cada una de las mismas difieren de la dirección de incidencia.

En el segundo caso el prisma a diferencia del anterior solo desviará una polarización de la dirección principal de incidencia, por lo que una de las polarizaciones resultantes se propagará en la misma dirección con la que se ha incidido y la otra se separará espacialmente

Estos prismas son caros y principalmente esa será la desventaja que tienen, ya que podremos utilizar otros elementos que hagan lo mismo pero con menor costo como el siguiente que analizaremos.

3.4.2 Dependiente del ángulo de incidencia

En este caso lo que haremos principalmente será variar el ángulo de incidencia sobre el elemento, esto producirá que parte de la onda incidida sea reflejada mientras que otra parte de la onda sea transmitida, pero para que este método funcione tendremos que introducir un ángulo específico y cumplir ciertas especificaciones.

El concepto anterior se puede ver con la siguiente imagen, esta representará un ángulo que forma con respecto al plano (cristal isotrópico):

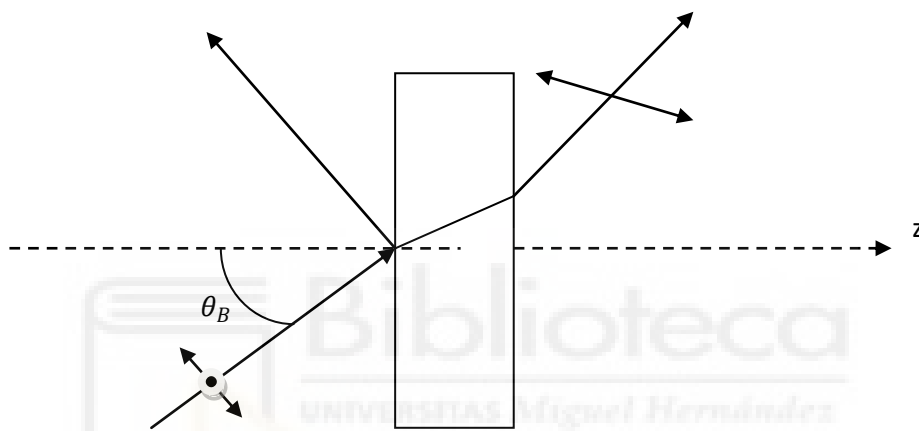


Figura 3.10. División de polarización dependiente de un ángulo θ_B

Como podemos observar existirá una incidencia en el elemento de una onda que presenta distintas polarizaciones.

En el caso anterior tendremos un ángulo θ_B , este se denominará “Ángulo de Brewster” y aparecerá en los casos donde exista un cambio de medio.

Para examinar un ángulo necesitaremos una incidencia por lo que independientemente de la inclinación sobre dicho plano, siempre tendrá que existir un cambio de medio para que esto ocurra. Lo anterior está vinculado con las características de cada medio, ya que estas deben diferir para que se produzca este fenómeno y por lo tanto como mínimo necesitaremos de dos medios para que se produzca.

Como bien podemos observar en la representación, el Ángulo de Brewster es aquel que permite aislar las polarizaciones en distintas direcciones, una siendo transmitida por dicho cristal y la otra no, pudiendo traspasarlo y perdiéndose en el espacio esto será debido a la alineación que presenta dichas polarizaciones sobre el dispositivo.

Tendremos que fijarnos en la orientación tanto de las polarizaciones de nuestra onda como del elemento que estemos estudiando.

En el caso de la orientación paralela de la polarización respecto al nuevo medio hará que este último deje transmitir en su totalidad la componente que está alineada consigo mismo, por lo que siempre colocaremos este elemento paralelamente a la polarización con la que queremos trabajar.

A su vez las polarizaciones que se descartarán serán las que incidan de manera perpendicular con el separador, es decir, el medio nuevo.

Dichas características de incidencia podemos resumirlas en:

- Polarización paralela: Se producirá una transmisión en una dirección determinada por el cambio de medio.
- Polarización perpendicular: Se producirá una reflexión específica para un determinado medio sobre este estado de la onda.

Aunque teóricamente esto sea cierto, en la realidad difiere en cierto modo, ya que aunque conozcamos el ángulo de incidencia y lo hagamos de forma correcta según toda esta explicación, siempre se conservará una polarización residual en ambos casos. Esto es muy importante debido a que nuestro sistema no será perfecto ya que presentará ciertas fallas.

Esto repercutirá en los resultados que obtendremos nosotros a nuestra salida, produciendo una serie de fenómenos que nos dispondremos a enumerar:

1. Polarización a la salida: La polarización a la salida no será perfecta, es decir, no obtendremos solamente la componente deseada sino que también obtendremos la otra de forma muy atenuada, debido a que la mayor parte de la otra polarización sí que se comportará conforme a lo anteriormente postulado y por tanto seguirá valiéndonos nuestra hipótesis inicial.
2. Polarización reflejada: En este caso también obtendríamos una parte residual en este caso de la polarización deseada, esto producirá un fenómeno que mencionaremos como tercer punto.

Como conclusión, tanto los prismas mencionados, como este método de cambio de medios e incidencias de ángulos presentarán cada uno ciertas ventajas e inconvenientes.

3.5 Espejos

Ahora haremos un inciso con respecto a los casos estudiados anteriormente, esto es debido a que este elemento no presenta la característica común que sí presentaban los casos anteriores y es que estamos hablando de un elemento que no varía la polarización de la señal.

En este caso nos interesará analizar este elemento por distintos motivos a los anteriores, debido a que no presenta la característica con la que hemos estado trabajando anteriormente.

Como bien sabemos los espejos son materiales reflectantes que presentan ciertas características físicas que permiten modificar la trayectoria de la luz, haciendo que se dirijan por otra dirección, está siendo determinada por el ángulo de incidencia del haz incidente.

Como veremos en el siguiente ejemplo podemos modificar la trayectoria utilizando los espejos:

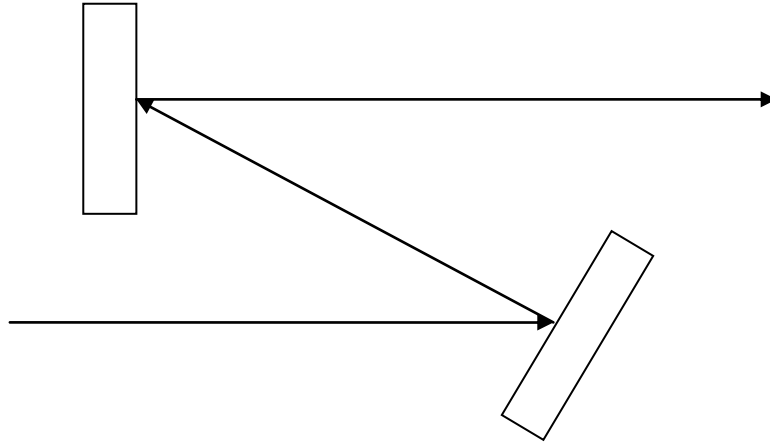


Figura 3.11. Modificación del rayo producido por dos espejos

Como podemos observar aparte de desviar la trayectoria de la onda, hemos hecho que se desplace la onda de tal forma que termine propagándose paralelamente con respecto a la trayectoria inicial, esto puede resultar útil en ciertos casos.

A parte y como aplicación principal en nuestro sistema, el elemento será fundamental a la hora de formar las cavidades, esto es debido a que será el objeto que delimite la cavidad que utilizaremos posteriormente, presentando la siguiente forma:



Figura 3.12. Representación gráfica de una cavidad formada por dos espejos

Siendo los espejos los elementos a los extremos, (E1 y E2 en el dibujo), presentaran una reflexión que no permitirá que la luz “salga” fuera de sus límites. Con el objetivo de estudiar y analizar sus características, las matrices de Jones nos darán un recurso para caracterizar su comportamiento:

$$E_r = \begin{bmatrix} r_x & 0 \\ 0 & r_y \end{bmatrix} \quad (52)$$

Estos coeficientes indican el nivel de refracción tanto en el eje x como en el eje y, estos se definirán de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} r_x &= \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \\ r_y &= \frac{n_1 \sec \theta_1 - n_2 \sec \theta_2}{n_1 \sec \theta_1 + n_2 \sec \theta_2} \end{aligned} \quad (53)$$

Quedando por lo tanto la siguiente expresión matricial:

$$E_r = \begin{bmatrix} \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} & 0 \\ 0 & \frac{n_1 \sec \theta_1 - n_2 \sec \theta_2}{n_1 \sec \theta_1 + n_2 \sec \theta_2} \end{bmatrix} \quad (54)$$

Hay que tener en cuenta que los coeficientes de reflexión de los espejos no son siempre perfectos, es decir, a veces no se refleja enteramente la luz sino que habrá espejos que dejaran transmitir en parte dicha energía total, estas matrices de transmisión serán las siguientes:

$$E_t = \begin{bmatrix} t_x & 0 \\ 0 & t_y \end{bmatrix} \quad (55)$$

Los coeficientes de transmisión estarán relacionados con los coeficientes de reflexión anteriormente definidos:

$$\begin{aligned} t_x &= \frac{1 + r_x}{2n_1 \cos \theta_1} \\ t_y &= (1 + r_y) \frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_2} \\ t_y &= \frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_2} \frac{2n_1 \sec \theta_1}{n_1 \sec \theta_1 + n_2 \sec \theta_2} \end{aligned} \quad (56)$$

Obteniendo por lo tanto la siguiente matriz:

$$E_t = \begin{bmatrix} \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} & 0 \\ 0 & \frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_2} \frac{2n_1 \sec \theta_1}{n_1 \sec \theta_1 + n_2 \sec \theta_2} \end{bmatrix} \quad (57)$$

Es importante que nuestra cavidad siempre deje transmitir cierta fracción de la intensidad del láser, esto es debido que al fin y al cabo, nuestro estudio se centrará en el análisis de dicha potencia en el receptor óptico externo a dicha cavidad, por lo que, si no dejáramos que la onda llegue a dicho detector no podremos realizar las comparaciones con la herramienta software.

Como podemos observar tanto la matriz E_r como la matriz E_t serán dependientes tanto de los índices de refracción como de los ángulos de incidencia.

3.6 Retardadores de onda

Por último vamos a estudiar los elementos retardadores de onda, como su nombre bien indica este producirá un desfase entre las componentes que componen la polarización, en nuestro caso x e y.

Por lo tanto para los retardadores de onda volveremos a tratar con elementos que afectan a la polarización de la onda y en este caso, objetos que presentarán índices de refracción distintos dependiendo de la coordenada que estemos estudiando.

Lo que quiere decir esto es que las componentes en este caso x e y presentarán distinto índice de refracción debido a las características ópticas del objeto, ya que estos materiales son distintos a los espejos estudiados con anterioridad en el que se trataban de materiales con un índice de refracción único para cualquier componente del elemento

Para poder observarlo de mejor manera introduciremos un ejemplo básico visual a continuación, para así comprender su funcionamiento:

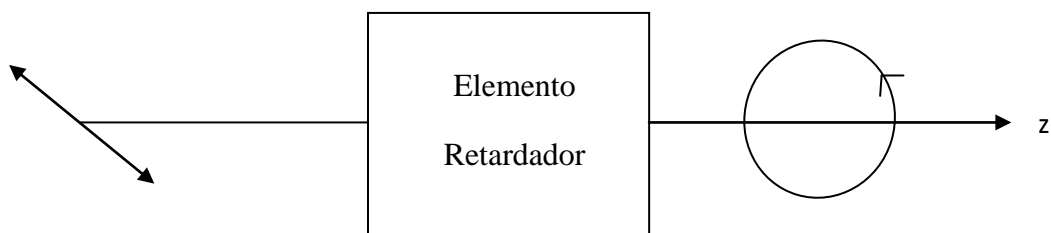


Figura 3.13. Representación básica efecto de un elemento retardador

Podemos observar que la polarización de la onda que incide con el elemento retardador, (elemento birrefringente), se ve modificada, esto es debido a que los índices de refracción influirán de distinta forma dependiendo del componente que se trate, en este caso por ejemplo hemos pasado de una polarización lineal a una circular por lo que la energía se repartirá de forma uniforme en ambas coordenadas.

Como este ejemplo hay muchos casos en los que variaremos la polarización de la onda incidente obteniendo una polarización deseada a la salida, este comportamiento será de suma utilidad en cavidades, ya que podremos obtener polarizaciones que sí conocemos a la salida.

Este caso básico nos indica cómo funciona el retardador en un caso en el que este conoce la polarización de la onda incidente, así como la incidencia sobre el mismo.

El anterior párrafo tiene importancia, ya que hay casos en los que no conocemos su estado, ya sea por error humano o debido a comportamientos en la cavidad. Ahora pasaremos a explicar de forma concreta un par de comportamientos que hacen que la onda a la entrada de los retardadores sea desconocida:

- Ángulo erróneo a la hora de colocar la fuente láser: Al necesitar en estos sistemas una gran precisión debido en parte al ángulo en el que incidirá el rayo en la estructura, tendremos que llevar mucho cuidado, tanto que a veces debido al error humano no podremos realizarlo de una manera correcta sin tener una referencia.
- Comportamiento del retardador: Alterará cualquier onda incidente independientemente de cuál sea, esto producirá comportamientos conocidos pero existirán problemas si no conocemos en su plenitud el rayo que interactuará con dicho elemento.
- Elemento Birrefringente mal colocado: Debido a la precisión de nuestro sistema no podemos permitirnos colocar mal los elementos birrefringentes, ya que dependiendo de la incidencia del láser a la entrada, se producirán distintos comportamientos a la salida de dicho elemento óptico.

Todo esto se debe a la característica principal de los elementos birrefringentes, ya que estos al tener diferentes índices de refracción harán que la onda incidente se vea muy afectada dependiendo de la posición y el ángulo en el que incida con respecto a dicho elemento óptico.

Para solucionar el problema podremos rotar manualmente el elemento birrefringente para obtener al final, ahora sí, una polarización conocida a la salida esto utilizando a nuestro favor los distintos índices anteriormente mencionados.

3.6.1 Rotación

Como bien explicábamos, un método a la hora de solucionar la problemática anteriormente planteada es usando una rotación manual sobre el elemento birrefringente produciendo así una alteración al variar los coeficientes de reflexión.

Ahora representaremos lo que estamos diciendo de una forma gráfica:

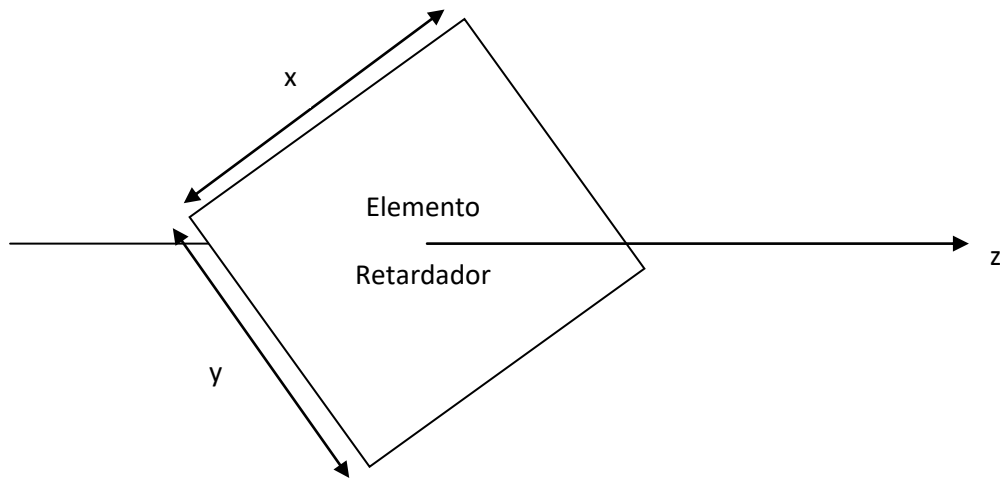


Figura 3.14. Representación de un retardador rotado un ángulo θ respecto al eje x

Podemos definir este método con las matrices de Jones, utilizando una matriz genérica como base (esto se debe a que la matriz general será explicada y analizada en el segundo de los casos).

Esta será la expresión que obtendremos:

$$\begin{aligned}
 M_r &= R(\theta)M R(-\theta) \\
 R(\theta) &= \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \text{sen}(\theta) \\ -\text{sen}(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \\
 R(-\theta) &= \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\text{sen}(\theta) \\ \text{sen}(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \\
 M_r &= \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \text{sen}(\theta) \\ -\text{sen}(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\text{sen}(\theta) \\ \text{sen}(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (58) \\
 M_r &= \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \text{sen}(\theta) \\ -\text{sen}(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{11} \cos(\theta) + M_{12} \text{sen}(\theta) & M_{12} \cos(\theta) - M_{11} \text{sen}(\theta) \\ M_{21} \cos(\theta) + M_{22} \text{sen}(\theta) & M_{22} \cos(\theta) - M_{21} \text{sen}(\theta) \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Siendo θ el valor del ángulo resultante con respecto al eje x .

El problema de este método es que no es del todo preciso, esto es debido a que a veces no podremos ajustar ángulo por ángulo los distintos elementos retardadores que tendrá nuestra cavidad de forma cómoda (necesitaremos un sistema de referencia), para ello utilizaremos una segunda opción que tendrá una función similar a la anterior, esta será más precisa y además podremos obtener variaciones en los elementos de forma sencilla para nosotros.

3.6.2 Control de la polarización mediante el efecto electro-óptico

Es importante y resulta muy útil saber que los índices de reflexión que hemos hablado con anterioridad dependerán en parte de la tensión aplicada por un sistema externo, así como también dependerá de elementos característicos del mismo retardador.

El esquema gráfico de este tipo de elementos con alimentación externa se verá de la siguiente forma:

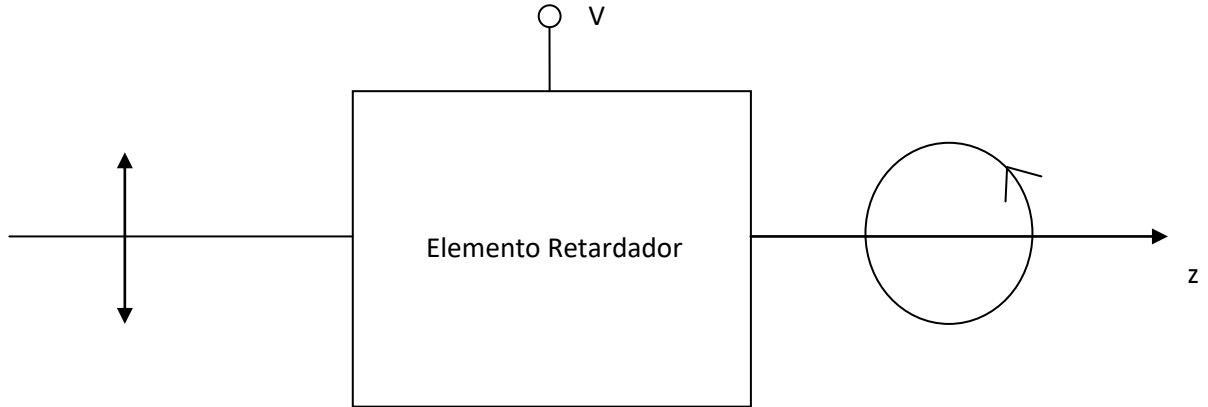


Figura 3.15. Elemento Retardador dependiente de una tensión aplicada

Como podemos ver en la figura aplicamos una tensión (V) esta hará que independientemente de la rotación que presente el retardador, podamos reajustar su matriz haciendo que obtengamos una polarización deseada a la salida.

Ahora examinando las matrices de Jones y habiendo descrito el efecto electro-óptico, podremos definir la matriz asociada al elemento retardador de forma general, esto es debido a que a partir del caso en el que incluimos el efecto electro-óptico, podemos obtener los escenarios en los que este no esté presente, siendo el último escenario planteado (sin V) más sencillo respecto a este caso general.

Toda esta explicación radicaré que al final obtengamos la siguiente matriz:

$$M_{er} = \begin{bmatrix} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_x l} & 0 \\ 0 & e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_y l} \end{bmatrix} \quad (59)$$

Sabemos que la definición tanto de n_x como de n_y , es decir, los índices de refracción dependerán del voltaje (efecto electro-óptico), a su vez sabemos que la exponencial anterior dependerá tanto de la longitud del elemento birrefringente como de su longitud de onda.

Como ya he mencionado, los índices dependerán de la tensión y lo harán de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} n_x(V) &= n_{0x} + \frac{1}{2}r_x n_{0x}^3 \frac{V}{d} \\ n_y(V) &= n_{0y} + \frac{1}{2}r_y n_{0y}^3 \frac{V}{d} \end{aligned} \quad (60)$$

Definiendo cada elemento sabemos que tanto n_{0x} como n_{0y} se tratarán de los índices de refracción intrínsecos a dichas coordenadas, mientras que r_x y r_y se tratarán de un valor óptico específico a cada una de las componentes (x e y), estas son dependientes a la tensión que apliquemos, además cada una será independiente de la otra ya que afectarán

tanto a x como a y de forma individual. También podremos renombrar r_x y r_y como “ s_x ” y “ s_y ” para no confundirnos con los coeficientes de reflexión.

V será la tensión aplicada definida anteriormente, mientras que d es la característica del espesor del material, cuanto mayor sea el espesor menor será el resultado del coeficiente que presenta con respecto a la tensión y por lo tanto menor importancia tendrá esta última parte de la expresión, en cambio cuanto menor sea el espesor, mayor efecto causará la tensión en el elemento birrefringente.

Particularizando en el caso en el que la tensión valga 0, obtendremos la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} n_x(0) &= n_{0x} \\ n_y(0) &= n_{0y} \end{aligned} \quad (61)$$

Como podemos observar los índices de refracción dependen de su valor inicial, es decir, del valor que presentan sin depender de otras características del elemento ni de factores externos cosa que no ocurría con anterioridad.

Ya explicado todo esto, vamos a escribir como quedaría el elemento birrefringente en el caso más complejo, es decir, existiendo tanto una rotación como introduciendo un efecto electro-óptico, esto se podrá obtener gracias a las expresiones (58) y (59).

$$\begin{aligned} M_{erotada} &= \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_x l} & 0 \\ 0 & e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_y l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \\ M_{erotada} &= \begin{bmatrix} \cos(\theta)^2 e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_x l} + \sin(\theta)^2 e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_y l} & \cos(\theta)\sin(\theta)(e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_y l} - e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_x l}) \\ \cos(\theta)\sin(\theta)(e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_y l} - e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_x l}) & \cos(\theta)^2 e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_y l} + \sin(\theta)^2 e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_x l} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (62)$$

3.7 Valores Propios

3.7.1 Definición y explicación de los valores propios

Para obtener la definición y características de los valores propios acudiremos al libro introducido en la bibliografía [6], gracias a este nos inspiraremos a la hora de realizar este apartado.

Ya habiendo esclarecido este tema, para cualquier tipo de combinación de los polarizadores ópticos existirán estados de la polarización que se mantendrán inalterados aunque pasemos por estos. A estas características se les denominarán, estados propios del sistema óptico y serán importantes a la hora de establecer las características de los resonadores ya que representarán las soluciones de los estados que obtendremos.

Siendo M^P una matriz de Jones de dimensiones desconocidas, el campo E_0 deberá ser proporcional con respecto a la salida E_1 de la siguiente forma:

$$E_1 = M^P E_0 = \mu^P E_0 \quad (63)$$

Siendo μ^P los valores propios asociados a la matriz de Jones.

Los estados propios estarán definidos por dos vectores propios relacionados con la matriz M^P . Ahora y volviendo con los valores propios, podremos estudiar su significado físico, este será revelado si comparamos la intensidad de entrada con respecto a la salida:

$$I_1 = \frac{1}{2} c \varepsilon_0 E_1 E_1^* = \mu^P \mu^{P*} \frac{1}{2} c \varepsilon_0 E_0 E_0^* = |\mu^P|^2 I_0 \quad (64)$$

Podemos observar que el valor $|\mu^P|^2$ representará una parte de la intensidad que presenta el rayo después de que pase por ciertos polarizadores. Este valor puede denominarse factor de pérdidas V . Parte de la potencia del haz se perderá debido a reflexiones (punto sobre el que indagaremos más en este trabajo) y por absorciones. La expresión de estas reflexiones es dada por la siguiente ecuación:

$$\Delta V = 1 - V \quad (65)$$

Utilizaremos las matrices de Jones que hemos analizado anteriormente (40), y ahora obtendremos los valores propios gracias a la siguiente expresión:

$$\mu_{1,2}^P = \frac{M_{11} + M_{22}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{M_{11} - M_{22}}{2}\right)^2 + M_{12}M_{21}} \quad (66)$$

Obteniendo por lo tanto dos valores propios, estos a su vez formarán los vectores propios de la siguiente forma:

$$E_i^p = \begin{pmatrix} 1 \\ \frac{\mu_i^P - M_{11}}{M_{12}} \end{pmatrix} \quad (67)$$

Siendo el caso general y pudiendo tomar i los valores de 1 o de 2, dependiendo del valor propio que se desee tomar.

En el caso de que los valores M_{12} y M_{21} sean iguales entre sí, y a la vez sean estos iguales a cero obtendremos las siguientes matrices (teniendo también estas matrices una estructura de dos filas y una columna).

$$\begin{aligned} E_1^P &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \\ E_2^P &= \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (68)$$

A partir de este caso general nos podemos hacer una idea de que ocurrirá para cada caso específico de cada elemento de la cavidad, ya que dependiendo de la estructura de la matriz, variarán los resultados de dichos valores propios.

3.7.2 Análisis de los estados propios asociados a la matriz de round-trip

El formalismo de las matrices de Jones nos permitirá determinar la polarización en las cavidades láser. Si existen elementos que polaricen la onda contenidos en dichas cavidades, la polarización que se genera se repetirá cada vez que recorramos el espacio confinado, ya que se habrá establecido cierto campo eléctrico. El valor de la polarización asociada a dicho campo eléctrico tendrá relación con respecto a la polarización de los estados propios de la matriz round-trip. Con todo lo anteriormente mencionado, podremos empezar dicho round-trip desde cualquier punto de la cavidad.

Habrá que tener en cuenta de que una onda láser solo se verá generada cuando el factor de pérdidas (V) en una de sus polarizaciones, sea inferior con respecto a la otra.

La explicación anterior es debida a que la polarización que presente unas mayores pérdidas tardará más en alcanzar cierto valor mínimo con respecto a aquella que presente una menor pérdida (mayor potencia). Después de la inicialización de la oscilación láser en este estado propio de la polarización, la ganancia de saturación permitirá que el que presente menor potencia alcance el valor mínimo.

En el caso de que tanto una polarización como la otra sean exactamente iguales provocará que el campo eléctrico resultante no esté polarizado.

4. Ejemplos de caracterizaciones de distintos elementos y cavidades a través de las matrices de Jones y sus valores propios

Ahora vamos a proponer un par de ejemplos, estos nos ayudarán a esclarecer ciertos temas anteriormente establecidos en teoría y además servirán de preámbulo para la elaboración del programa que implementaremos a la hora de intuir los distintos comportamientos y casos especificados.

Primero plantearemos los problemas de manera teórica ante esto elaboraremos una solución que introduciremos en el programa (Matlab), que nos ayudará a la hora de establecer un gráfico más visual y obtener ciertas dependencias que de otra manera nos serían complicadas de obtener.

Lo que queremos obtener en estos casos teóricos y en el programa que realizaremos será la matriz round-trip de la cavidad anteriormente descrita.

Este dato nos será muy útil, porque en uno de los ejemplos veremos los sucesos, implicaciones y relaciones que tendrá el hecho de empezar desde un punto u otro de la cavidad siempre respetando la definición de round-trip anteriormente formulada, con el fin de comparar tanto las distintas matrices obtenidas como a la hora de valorar los distintos valores propios asociados.

Ya habiendo establecido lo que queremos obtener, además de tener los distintos datos, realizaremos una comparación entre los resultados obtenidos teóricamente y los que extraeremos de una forma real, este proceso será realizado en otro apartado del trabajo (Parte 6).

La obtención de dichos resultados experimentales se realizará en un laboratorio con las mismas condiciones que hemos establecido en la parte teórica, es decir, se presentará un escenario idéntico, por lo que las características serán las mismas para poder comparar posteriormente con coherencia.

Este párrafo anterior en el que se especifica que los resultados reales se compararán con los teóricos, realmente se aplicará a un modelo implementado que utiliza como idea los cálculos que vamos a realizar en este apartado, por lo que esta será la base de un programa que en un futuro nos permitirá realizar de una forma cómoda, todos estos cálculos que nos llevarían una considerable cantidad de tiempo y además, podremos expandir los distintos elementos que podrá contener una cavidad.

Ya habiendo establecida la metodología que vamos a aplicar estableceremos por lo tanto el primer ejemplo.

4.1 Ejemplo del cálculo matricial de un elemento birrefringente

Para este caso estableceremos solo un elemento birrefringente, presenta ciertas características que definiremos a continuación:

- Esquema de un elemento birrefringente con rotación mecánica:

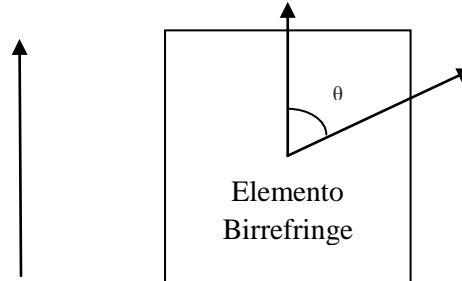


Figura 4.1. Ejemplo de un único elemento birrefringente con rotación

- Características:

Onda:

Longitud de onda: 1342 nm

Elemento Birrefringente:

$L = 10 \text{ mm}$

$d = 8 \text{ mm}$

$n_x = 1,7980$

$n_y = 1,7411$

Cristal KTP

El cristal KTP es un tipo de elemento óptico que presenta ciertas características únicas que afectan directamente a la polarización, como distintos valores de refracción (x respecto a y o viceversa). Por lo que al fin y al cabo actuará como un elemento birrefringente que al final será lo que estemos buscando en nuestro caso.

Definimos la entrada (Polarización Vertical):

Suponemos la siguiente orientación. (E. Birrefringente).

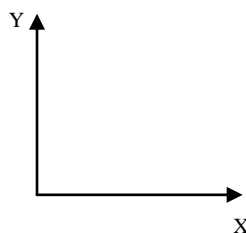


Figura 4.2.Plano de polarización de los ejemplos a estudiar

Al presentar una polarización vertical a su entrada implicará por tanto que estará orientado en el eje y:

$$M_E = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (69)$$

Esto lo tendremos como referencia aunque en nuestro ejemplo no será relevante puesto a que únicamente vamos a estudiar el comportamiento del elemento birrefringente.

Ahora trataremos la rotación indicada en el esquema ejercida en el elemento birrefringente que anteriormente hemos definido:

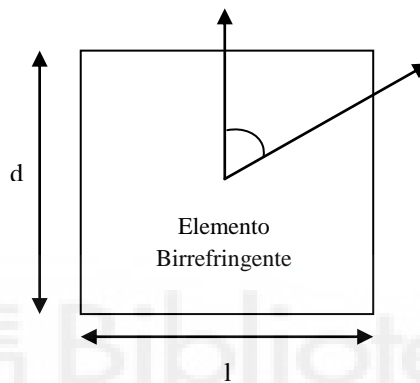


Figura 4.3.Dimensiones del elemento birrefringente

Utilizaremos la fórmula de la rotación para poder definir este comportamiento:

$$[T' = R(\theta)TR(-\theta)] \quad (70)$$

Siendo $R(\theta)$ la rotación ejercida por un ángulo theta, $R(-\theta)$ la rotación ejercida por un ángulo theta negado y T siendo un elemento birrefringente sin rotar.

Definimos la rotación del ángulo theta (θ):

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\text{sen}(\theta) \\ \text{sen}(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (71)$$

Definiremos la rotación del ángulo theta negada ($-\theta$):

$$R(-\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \text{sen}(\theta) \\ -\text{sen}(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (72)$$

Ahora definiremos el elemento birrefringente sin rotar, es decir, de una manera estática en un punto en el que esté centrado, como anteriormente hemos definido (tendrá coordenadas de polarización en el plano xy).

Como hemos visto en el apartado anterior al estar definido en un plano xy tendremos una componente en cada uno de estos ejes. Como ya hemos analizado teóricamente, cada componente presenta un índice de refracción distinto si es un elemento birrefringente.

Definiremos por tanto el elemento birrefringente de una manera general sin rotación denominándolo T:

$$T = \begin{bmatrix} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_x l} & 0 \\ 0 & e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_y l} \end{bmatrix} \quad (73)$$

n_x y n_y son dependientes de distintos parámetros que tendremos que observar para el caso que estamos tratando, las fórmulas generales son las establecidas en las expresiones (60).

Utilizando la expresión anterior, vemos que existe un parámetro V en el segundo término de ambas ecuaciones, tanto n_x como n_y , este valor se tratará de la tensión aplicada al elemento birrefringente. Como en nuestro caso no se aplica tensión sabemos que:

$$V = 0$$

Y por lo tanto

$$\begin{aligned} n_x(v) &= n_{0x} = 1,7980 \\ n_y(v) &= n_{0y} = 1,7411 \end{aligned} \quad (74)$$

Realizaremos el producto entre las matrices de rotación y la matriz del elemento birrefringente (T), obteniendo la matriz rotada T' :

$$\begin{aligned} T' &= R(\theta)TR(-\theta) \\ T' &= \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_{0x}l} & 0 \\ 0 & e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_{0y}l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \\ T' &= \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta)e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_{0x}l} & \sin(\theta)e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_{0x}l} \\ -\sin(\theta)e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_{0y}l} & \cos(\theta)e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_{0y}l} \end{bmatrix} \\ T' &= \begin{bmatrix} \cos^2(\theta)e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_{0x}l} + \sin^2(\theta)e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_{0y}l} & \cos(\theta)\sin(\theta)(e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_{0y}l} - e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_{0x}l}) \\ \cos(\theta)\sin(\theta)(e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_{0y}l} - e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_{0x}l}) & \cos^2(\theta)e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_{0y}l} + \sin^2(\theta)e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_{0x}l} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (75)$$

Ahora sustituimos los datos del planteamiento del problema, en la matriz T' obtenida. Esta matriz reflejará el comportamiento que ejerce el elemento birrefringente rotado.

$$T' = \begin{bmatrix} \cos^2(\theta)e^{-j26,796 \cdot 10^3 \pi} + \sin^2(\theta)e^{-j25,95 \cdot 10^3 \pi} & \cos(\theta)\sin(\theta)(e^{-j25,95 \cdot 10^3 \pi} - e^{-j26,796 \cdot 10^3 \pi}) \\ \cos(\theta)\sin(\theta)(e^{-j25,95 \cdot 10^3 \pi} - e^{-j26,796 \cdot 10^3 \pi}) & \cos^2(\theta)e^{-j25,95 \cdot 10^3 \pi} + \sin^2(\theta)e^{-j26,796 \cdot 10^3 \pi} \end{bmatrix} \quad (76)$$

4.2 Cálculo matricial y obtención de los valores propios de una cavidad formada por cuatro elementos

Para este ejemplo establecemos cuatro elementos, entre ellos se encuentran dos espejos y dos elementos birrefringentes. Ahora estableceremos tanto la estructura como las características de cada uno de ellos, al igual que hicimos en el caso anterior.

- Esquema de una cavidad de cuatro elementos:

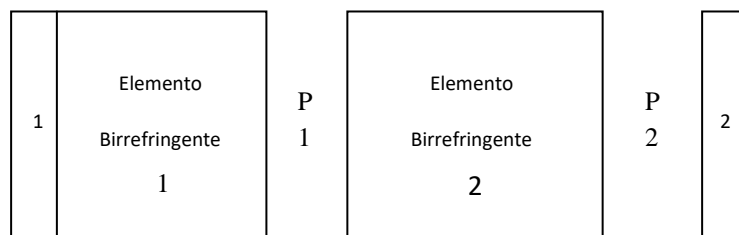


Figura 4.4. Cavidad formada por cuatro elementos, (2 espejos y 2 elementos birrefringentes).

- Índice de la imagen
1: Espejo de entrada de la cavidad planteada.

Elemento Birrefringente 1

P1: Punto 1 para el análisis del round-trip

Elemento Birrefringente 2

P2: Punto 2 para el análisis del round-trip

2: Espejo de salida de la cavidad planteada.

- Definición de coordenadas:

Las coordenadas que escogeremos en este caso serán las mismas que para el primer ejemplo (Figura 1.2), teniendo en el plano de polarización el eje (x-y) y el de propagación de la onda siendo el eje z.

4.2.1 Definición de los elementos de la cavidad

Espejo 1:

$$r_x = 1$$

$$r_y = 1$$

Elemento Birrefringente 1:

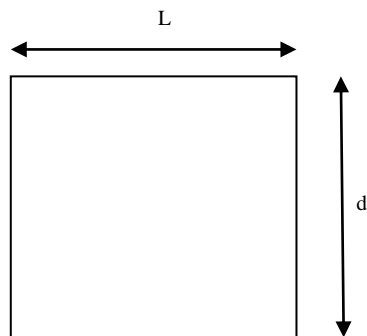


Figura 4.5. Dimensiones del elemento birrefringente 1 de la cavidad

$$d = 4 \text{ mm}$$

$$L = 5 \text{ mm}$$

$$n_x = 1.75$$

$$n_y = 1.73$$

Elemento Birrefringente 2:

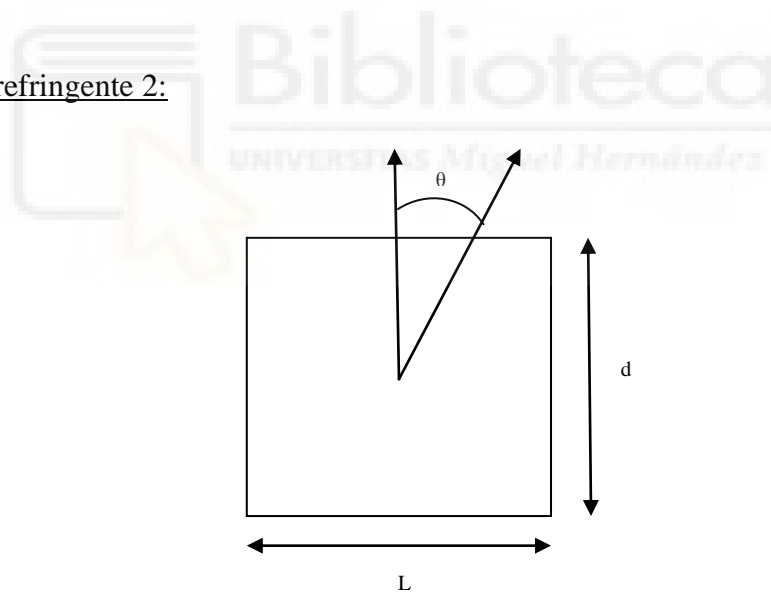


Figura 4.6. Dimensiones y ángulo de rotación del elemento birrefringente 2 de la cavidad

$$d = 8 \text{ mm}$$

$$L = 10 \text{ mm}$$

$$n_x = 1.7980$$

$$n_y = 1.7411$$

Espejo 2:

$$r_x = 0.9$$

$$r_y = 0.8$$

Ahora definimos los distintos componentes que componen nuestro ejemplo, gracias tanto a los conocimientos de teoría como a los datos proporcionados. Para definirlos necesitamos crear su matriz característica (matriz de Jones) y posteriormente definiremos el conjunto del sistema como la combinación de todas estas matrices formando así la matriz round-trip anteriormente mencionada.

4.2.1.1 Matriz del espejo 1

Al definir una reflectividad de “1” tanto en la componente x como en y, querrá decir que la reflexión es máxima, por lo tanto no existirá una transmisión ni en x ni en y, esto causará que la matriz de transmisión sea igual a cero en cualquiera de sus componentes, es decir, t_x y t_y tomarán valores nulos.

Ya habiendo esclarecido esto, definiremos la matriz:

$$r_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (77)$$

Esto crea una onda reflejada uniformemente tanto en la coordenada x como en la y.

4.2.1.2 Matriz del espejo 2

A diferencia del caso del espejo 1, no presenta una reflexión absoluta, quiere decir que en este caso sí que se producirá una transmisión.

Ya habiendo definido anteriormente la reflexión tanto en x como en y, podremos definir la matriz característica de este elemento:

$$r_2 = \begin{bmatrix} 0.9 & 0 \\ 0 & 0.8 \end{bmatrix} \quad (78)$$

Obtenemos ahora la matriz de transmisión, para ello obtendremos tanto la transmisión en el eje x como en y:

$$\begin{aligned} t_x &= 1 - 0.9 = 0.1 \\ t_y &= (1 - r_y) \frac{\cos(\theta_1)}{\cos(\theta_2)} \end{aligned} \quad (79)$$

Utilizamos la ley de Snell para obtener el valor de transmisión únicamente dependiente del ángulo incidente de manera general, después sustituiremos para nuestro caso en específico:

$$\text{Ley de Snell: } n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \quad (80)$$

Despejamos en función de θ_2 , esto me ayudará a la hora de obtener la transmisión únicamente en función de θ_1 .

$$\theta_2 = \arcsen\left(\frac{n_1}{n_2}\text{sen}(\theta_1)\right) \quad (81)$$

Obtenemos finalmente el siguiente valor de transmisión en la coordenada y:

$$t_y = 0.2 * \frac{\cos(\theta_1)}{\cos\left(\arcsen\left(\frac{n_1}{n_2}\text{sen}(\theta_1)\right)\right)} \quad (82)$$

Nuestro caso concreto especifica que el ángulo de incidencia en el espejo es de cero grados, esto es debido a que como bien se puede observar en el dibujo realizado con anterioridad existe incidencia normal a dicho componente por lo que finalmente obtenemos el valor real de t_y sustituyendo en θ_1 :

$$t_y = 0.2 * \frac{\cos(0)}{\cos\left(\arcsen\left(\frac{n_1}{1}\text{sen}(0)\right)\right)} \quad (83)$$

Obteniendo por lo tanto el siguiente resultado de transmisión para la componente y:

$$t_y = 0.2 * \frac{\cos(0)}{\cos(\arcsen(0))} \quad (84)$$

$$t_y = 0.2$$

Y por lo tanto formando la siguiente matriz de transferencia:

$$t2 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.2 \end{bmatrix} \quad (85)$$

Esta matriz será útil en el caso del estudio de la señal fuera del medio confinado, es decir, lo que captará el detector óptico de una onda que salga de la cavidad. No obtendremos un cambio en la polarización de la luz con respecto al interior de la cavidad (como ya hemos explicado con anterioridad los espejos son elementos pasivos), lo que estaremos haciendo realmente es disminuir el módulo de la intensidad que obtendremos en el detector o lo que es lo mismo, la onda polarizada dentro de la cavidad es la misma que la que sale de esta pero mientras que la primera presenta una mayor potencia o intensidad, la segunda disminuye haciendo necesario que el umbral del receptor sea el correcto para poder captar dicha onda atenuada.

4.2.1.3 Matriz del elemento birrefringente 1

No aplicamos ninguna tensión por lo tanto definiremos el voltaje aplicado como:

$$V = 0$$

Al no existir ninguna rotación tampoco, definiremos el ángulo de rotación como nulo:

$$\theta = 0$$

Conociendo estos datos sustituiremos en el caso general, en el que se tendrá en cuenta tanto la rotación como la tensión de dicho elemento.

En el caso de rotación utilizaremos la expresión (71) y su contraparte negada (72), sabremos por tanto en nuestro caso que tomarán las expresiones la siguiente forma:

Matriz de rotación del ángulo positivo ($R(\theta)$):

$$R(0) = \begin{bmatrix} \cos(0) & -\text{sen}(0) \\ \text{sen}(0) & \cos(0) \end{bmatrix} \quad (86)$$
$$R(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Matriz de rotación del ángulo negativo ($R(-\theta)$):

$$R(-0) = \begin{bmatrix} \cos(0) & \text{sen}(0) \\ -\text{sen}(0) & \cos(0) \end{bmatrix} \quad (87)$$
$$R(-0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Como podemos observar se formarán por tanto dos matrices identidad que al realizar el producto con la matriz característica del elemento birrefringente se mantendrá invariante (esta sería la definición de matriz identidad).

Al no depender tampoco de una tensión ejercida sobre este elemento birrefringente, tendremos en cuenta los resultados anteriormente obtenidos (60) y que nos servirán como base a la hora de obtener la matriz característica en este caso.

Por lo tanto sustituyendo dicha ecuación para valores de tensión ($V = 0$) obtendremos:

$$n_x(0) = n_{0x} + \frac{1}{2} r_x * n_{0x}^3 \frac{0}{d} \quad (88)$$
$$n_y(0) = n_{0y} + \frac{1}{2} r_y * n_{0y}^3 \frac{0}{d}$$

Obteniendo inmediatamente que:

$$n_x(0) = n_{0x} \quad (89)$$
$$n_y(0) = n_{0y}$$

Ahora definiremos la matriz resultante de todas estas operaciones, empezaremos por su base que estará ligada tanto a su índice en el eje x como en su eje y, este resultado se obtiene al haber operado la matriz (73) de forma específica:

$$EB_1 = \begin{bmatrix} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_{0x}l} & 0 \\ 0 & e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_{0y}l} \end{bmatrix} \quad (90)$$

Sustituimos ahora por los datos proporcionados:

$$EB_1 = \begin{bmatrix} e^{-j\frac{2\pi}{1342*10^{-9}}*1,75*5*10^{-3}} & 0 \\ 0 & e^{-j\frac{2\pi}{1342*10^{-9}}*1,73*5*10^{-3}} \end{bmatrix} \quad (91)$$

$$EB_1 = \begin{bmatrix} e^{-j2\pi 6520,12} & 0 \\ 0 & e^{-j2\pi 6445,60} \end{bmatrix}$$

4.2.1.4 Matriz del elemento Birrefringente 2

Hemos definido una dependencia únicamente con el ángulo de rotación, por lo que el efecto electro-óptico externo será inexistente. A partir de estas afirmaciones obtendremos los siguientes datos:

$$V = 0$$

θ Variable

Ahora definimos la matriz característica de este elemento birrefringente:

$$EB_{2rotado} = R(\theta)EB_2R(-\theta) \quad (92)$$

Al igual que para el elemento 1 de esta cavidad, en este caso tampoco existirá ninguna dependencia de tensión, por lo que se abarcará de una manera similar la obtención de la matriz asociada a dicha característica, obteniendo por lo tanto un valor de V igual a cero. Utilizaremos la ecuación (88).

En específico observamos los parámetros de la matriz sin aplicar ninguna clase de rotación:

$$EB_2 = \begin{bmatrix} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_xl} & 0 \\ 0 & e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_y l} \end{bmatrix} \quad (93)$$

Al conocer las dependencias de este elemento, podemos definir ambos índices de reflexión. Utilizaremos las expresiones descritas anteriormente, es decir, (60)

Estableciendo por lo tanto los siguientes valores para ambos casos, debido a la ausencia de tensiones:

$$\begin{aligned} n_x &= n_{0x} = 1,7980 \\ n_y &= n_{0y} = 1,7411 \end{aligned} \quad (94)$$

Utilizaremos las expresiones de las matrices de rotación de forma general (dependencia con respecto a θ) (62), ya que como hemos descrito anteriormente, aplicaremos una rotación mecánica a este elemento birrefringente.

Ya habiendo establecido nuestro caso y sustituyendo en cada una de las matrices, podemos obtener la matriz para el elemento dependiente del ángulo de rotación:

$$\begin{aligned} EB_2 \text{rotado} &= \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\text{sen}(\theta) \\ \text{sen}(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_{0x}l} & 0 \\ 0 & e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_{0y}l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \text{sen}(\theta) \\ -\text{sen}(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \\ EB_2 \text{rotado} &= \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\text{sen}(\theta) \\ \text{sen}(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta)e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_{0x}l} & \text{sen}(\theta)e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_{0x}l} \\ -\text{sen}(\theta)e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_{0y}l} & \cos(\theta)e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_{0y}l} \end{bmatrix} \quad (95) \\ EB_2 \text{rot} &= \begin{bmatrix} \cos^2(\theta)e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_{0x}l} + \text{sen}^2(\theta)e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_{0y}l} & \cos(\theta)\text{sen}(\theta)(e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_{0x}l} - e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_{0y}l}) \\ \cos(\theta)\text{sen}(\theta)(e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_{0x}l} - e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_{0y}l}) & \cos^2(\theta)e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_{0y}l} + \text{sen}^2(\theta)e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_{0x}l} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$EB_2 \text{rot} = \begin{bmatrix} \cos^2(\theta)e^{-j2\pi 13397,91} + \text{sen}^2(\theta)e^{-j2\pi 12973,91952} & \cos(\theta)\text{sen}(\theta)(e^{-j2\pi 13397,91} - e^{-j2\pi 12973,91952}) \\ \cos(\theta)\text{sen}(\theta)(e^{-j2\pi 13397,91} - e^{-j2\pi 12973,91952}) & \cos^2(\theta)e^{-j2\pi 12973,91952} + \text{sen}^2(\theta)e^{-j2\pi 13397,91} \end{bmatrix} \quad (96)$$

4.2.2 Análisis sobre el punto uno

4.2.2.1 Obtención de la matriz round-trip

La obtención por lo tanto el round-trip se realizará de la siguiente forma para el punto 1 anteriormente señalado. Primero estableciendo el orden de multiplicación de cada una de las matrices características de los distintos elementos del sistema. Primero iremos hacia la izquierda y después cuando encontremos el espejo 1, cambiamos de sentido. Seguiremos multiplicando cada matriz hasta encontrarnos con la matriz característica del espejo dos, y después volveremos hasta el punto comprendido entre el elemento birrefringente uno y el dos.

La definición será la siguiente:

$$\text{round trip} = EB_2 \text{rot} \times r2 \times EB_2 \text{rot} \times EB_1 \times r1 \times EB_1 \quad (97)$$

$$r1 \times EB_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-j2\pi 6520,12} & 0 \\ 0 & e^{-j2\pi 6445,60} \end{bmatrix} = EB_1 \quad (98)$$

$$EB_1 \times EB_1 = \begin{bmatrix} e^{-j2\pi 6520,12} & 0 \\ 0 & e^{-j2\pi 6445,60} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-j2\pi 6520,12} & 0 \\ 0 & e^{-j2\pi 6445,60} \end{bmatrix} = \quad (99)$$

$$\begin{bmatrix} e^{-j2\pi 13040,24} & 0 \\ 0 & e^{-j2\pi 12891,2} \end{bmatrix}$$

$$EB_2 rot x EB_1 x EB_1 = EB_2 rot x \begin{bmatrix} e^{-j2\pi 13040,24} & 0 \\ 0 & e^{-j2\pi 12891,2} \end{bmatrix} \quad (100)$$

La anterior expresión se puede expresar de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} EB2_{11}e^{-j2\pi 13040,24} & EB2_{12}e^{-j2\pi 12891,2} \\ EB2_{21}e^{-j2\pi 13040,24} & EB2_{22}e^{-j2\pi 12891,2} \end{bmatrix} \quad (101)$$

Esta matriz podemos llamarla por ejemplo T1, esto se utilizará para simplificar expresiones:

$$r2 x T1 = \begin{bmatrix} 0.9 * EB2_{11}e^{-j2\pi 13040,24} & 0.9 * EB2_{12}e^{-j2\pi 12891,2} \\ 0.8 * EB2_{21}e^{-j2\pi 13040,24} & 0.8 * EB2_{22}e^{-j2\pi 12891,2} \end{bmatrix} \quad (102)$$

$$Round trip = EB_2 rot x r2 x T1 \quad (103)$$

Sabemos por la matriz $EB_2 rot$ que tanto $EB2_{12}$ como $EB2_{21}$ presentan la misma expresión.

$$round trip = \begin{bmatrix} 0.9 * EB2_{11}^2 e^{-j2\pi 13040,24} + 0.8 * EB2_{21}^2 e^{-j2\pi 13040,24} & 0.9 * EB2_{11} EB2_{12} e^{-j2\pi 12891,2} + 0.8 * EB2_{12} EB2_{22} e^{-j2\pi 12891,2} \\ 0.9 * EB2_{11} EB2_{21} e^{-j2\pi 13040,24} + 0.8 * EB2_{21} EB2_{22} e^{-j2\pi 13040,24} & 0.9 * EB2_{12}^2 e^{-j2\pi 12891,2} + 0.8 * EB2_{22}^2 e^{-j2\pi 12891,2} \end{bmatrix} \quad (104)$$

Obtenemos los valores de los distintos productos del round-trip, y finalmente obtendremos la expresión total:

$$\begin{aligned} EB2_{11}^2 &= (\cos^2(\theta)e^{-j2\pi 13397,91} + \sin^2(\theta)e^{-j2\pi 12973,92})^2 \\ EB2_{11}^2 &= \cos^4(\theta)e^{-j4\pi 13397,91} + \sin^4(\theta)e^{-j4\pi 12973,92} \\ &\quad + 2\cos^2(\theta)\sin^2(\theta)e^{-j2\pi 26371,83} \\ EB2_{22}^2 &= (\cos^2(\theta)e^{-j2\pi 12973,92} + \sin^2(\theta)e^{-j2\pi 13397,91})^2 \\ EB2_{22}^2 &= \cos^4(\theta)e^{-j4\pi 12973,92} + \sin^4(\theta)e^{-j4\pi 13397,91} \\ &\quad + 2\cos^2(\theta)\sin^2(\theta)e^{-j2\pi 26371,83} \\ EB2_{12}^2 &= \cos^2(\theta)\sin^2(\theta)e^{-j4\pi 12973,92} + \cos^2(\theta)\sin^2(\theta)e^{-j4\pi 13397,91} \\ &\quad - 2\cos^2(\theta)\sin^2(\theta)(e^{-j2\pi 26371,83}) \end{aligned} \quad (105)$$

Por las relaciones establecidas anteriormente conocemos las siguientes igualdades:

$$\begin{aligned} EB2_{11} * EB2_{12} &= EB2_{11} * EB2_{21} \\ EB2_{22} * EB2_{12} &= EB2_{22} * EB2_{21} \end{aligned} \quad (106)$$

$$\begin{aligned}
EB2_{11}EB2_{12} &= (\cos^2(\theta)e^{-j2\pi 13397,91} \\
&\quad + \sin^2(\theta)e^{-j2\pi 12973,92}) \cos(\theta) \sin(\theta)(e^{-j2\pi 12973,92} \\
&\quad - e^{-j2\pi 13397,91}) \\
EB2_{11}EB2_{12} &= \cos^3(\theta)\sin(\theta)(e^{-j2\pi 26371,83} - e^{-j2\pi 26795,82}) \\
&\quad + \cos(\theta)\sin^3(\theta)(e^{-j2\pi 25947,84} - e^{-j2\pi 26371,83})
\end{aligned} \tag{107}$$

Este valor obtenido será igual por tanto para $EB2_{11}EB2_{21}$

$$\begin{aligned}
EB2_{22} * EB2_{12} &= \\
(\cos^2(\theta)e^{-j2\pi 12973,92} + \sin^2(\theta)e^{-j2\pi 13397,91})(\cos(\theta) \sin(\theta)(e^{-j2\pi 12973,92} \\
&\quad - e^{-j2\pi 13397,91}) \\
EB2_{22} * EB2_{12} &= \cos^3(\theta)\sin(\theta)(e^{-j2\pi 25947,84} - e^{-j2\pi 26371,83}) \\
&\quad + \cos(\theta)\sin^3(\theta)(e^{-j2\pi 26371,83} - e^{-j2\pi 26795,82})
\end{aligned} \tag{108}$$

4.2.2.2 Código y Representación de los valores propios asociados al primer punto

Ya habiendo obtenido la matriz que define a la cavidad tendremos que realizar una representación del comportamiento de esta misma sobre cualquier señal, para ello lo mejor es obtener los valores propios asociados a la matriz round-trip.

Código

```

r1 = [1,0;0,1];
r2 = [0.9,0;0,0.8];
lambda=1.342e-6;
r1x = 1;
r1y = 1;
r2x = 0.9;
r2y = 0.8;
%CRISTAL BIRREFRINGENTE 1
d1=5e-3;
nx1=1.75;
ny1=1.73;

%CRISTAL BIRREFRINGENTE 2
d2=10e-3;
nx2=1.7980;
ny2=1.7411;

theta=[0:1:360]*pi/180;
b1x=exp(-i*2*pi*d1*nx1/lambda);
b1y=exp(-i*2*pi*d1*ny1/lambda);
b2x=exp(-i*2*pi*d2*nx2/lambda);
b2y=exp(-i*2*pi*d2*ny2/lambda);
EB1 = [b1x,0;0,b1y];
EB2 = [b2x,0;0,b2y];
%%
salt = 0;
cambia = 0;
nsaltoanterior = 0;
for i = 1:length(theta)
Rp=[cos(theta(i)) -sin(theta(i));sin(theta(i)) cos(theta(i))];
Rn=[cos(theta(i)) sin(theta(i));-sin(theta(i)) cos(theta(i))];
EB2a=Rp*EB2*Rn;

```

```

term(:, :, i) = EB1*r1*EB1*EB2a*r2*EB2a;
if i == 1
    termeig(:, i) = eig(term(:, :, i));
    termeig2(:, i) = eig(term(:, :, i));

else
    termeig(:, i) = eig(term(:, :, i));
    a = termeig(:, i) - termeig(:, i-1);
    amostrar{:, i} = a;
    ahaber = abs(a(1, 1));
    matriz{:, i} = ahaber;

    imag1(1, i) = imag(termeig(1, i));
    imag2(2, i) = imag(termeig(2, i));
    comp1 = abs(imag1(1, i) - imag1(1, i-1));
    comp2 = abs(imag2(2, i) - imag1(1, i-1));
    vabst1 = abs(termeig(1, i) - termeig(1, i-1));
    vabst2 = abs(termeig(2, i) - termeig(1, i-1));
    if comp1 > comp2 && vabst1 > vabst2 && salt == 0
        nsaltoanterior = i;
        cambia = 1;
        salt = 1;
    end

    if comp1 > comp2 && vabst1 > vabst2 && nsaltoanterior ~= i
        salt = 0;
        cambia = 0;
    end

    %termeigaux(:, i) = termeig(:, i);
    if cambia == 1
        termeig2(:, i) = flip(termeig(:, i));
    end

    if cambia == 0
        termeig2(:, i) = termeig(:, i);
    end

end

end

figure()
plot(theta, (abs (termeig2(1, :))).^2)
MinCosa1 = min((abs (termeig2(1, :))).^2);
MaxCosa1 = max((abs (termeig2(1, :))).^2);
MinCosa1;
MaxCosa1;
hold on
plot(theta, (abs (termeig2(2, :))).^2, 'r')
MinCosa2 = min((abs (termeig2(2, :))).^2);
MaxCosa2 = max((abs (termeig2(2, :))).^2);
MinCosa2;
MaxCosa2;
xlabel('Radianes (\theta)')
ylabel('Pérdidas dependiente polarización')
legend('Polarización x', 'Polarización y')

```

- Representación:

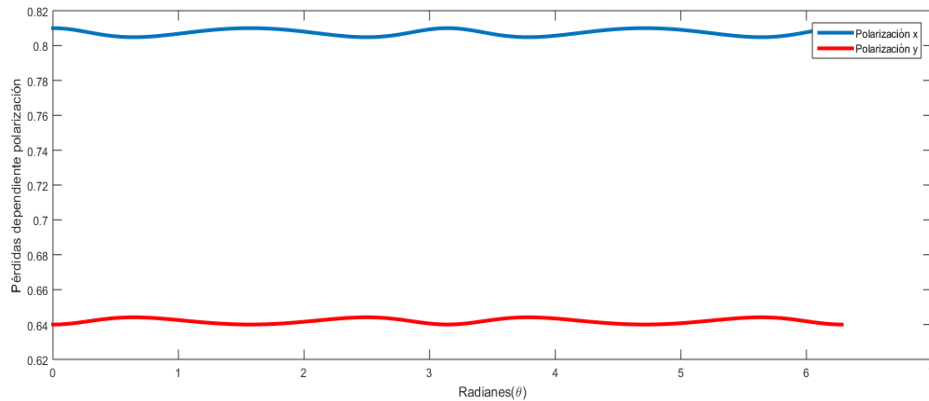


Figura 4.7. Transmitancia dependientes a la polarización asociadas a la matriz round-trip generada a partir del punto uno

4.2.3 Análisis sobre el punto dos

Habiendo obtenido ya los valores propios en el caso del punto uno, intentaremos obtener los que se producirán desde el punto 2. Para ello al igual que hemos realizado en el caso anterior, utilizaremos las matrices de Jones de los distintos elementos que componen la cavidad.

Al tratarse de un punto distinto de la cavidad, tendremos que tener en cuenta el orden en el que se realizarán los productos, ya que la matriz round-trip generada a partir de este punto será distinta con respecto al caso anterior.

4.2.3.1 Obtención de la matriz round-trip

Ya teniendo esto en cuenta, calcularemos y en definitiva obtendremos la matriz round-trip asociada a este caso. Es importante que con el objetivo de compararla con el caso anterior, deberemos realizar el producto de la misma forma, es decir, deberemos seguir el orden de operación que hemos hecho anteriormente.

El orden del producto irá por lo tanto desde el punto dos hacia la izquierda topándose con el espejo 1 y posteriormente reflejándose, ya que tendremos que multiplicar cada elemento de la cavidad dos veces dentro de la expresión de la matriz round-trip, a excepción de los espejos en sus extremos, por los que la señal solo “pasará” una única vez reflejándose este comportamiento dentro de la expresión de la matriz como el producto en solo una ocasión de cada una de las matrices de reflexión de ambos espejos.

$$M_{round-trip} = r2 \times EB_2 \text{ rot} \times EB_1 \times r1 \times EB_1 \times EB_2 \text{ rot} \quad (109)$$

Ya conociendo las matrices asociadas a cada una de los elementos de la cavidad obtendremos los siguientes productos.

$$EB_1 x EB_2 rot = \begin{bmatrix} EB2_{11} e^{-j2\pi 6520.12} & EB2_{12} e^{-j2\pi 6520.12} \\ EB2_{21} e^{-j2\pi 6445.6} & EB2_{22} e^{-j2\pi 6445.6} \end{bmatrix} \quad (110)$$

$$r1 x EB_1 x EB_2 rot = EB_1 x EB_2 rot$$

$$EB_1 x EB_1 x EB_2 rot = \begin{bmatrix} EB2_{11} e^{-j2\pi 13040.24} & EB2_{12} e^{-j2\pi 13040.24} \\ EB2_{21} e^{-j2\pi 12891.2} & EB2_{22} e^{-j2\pi 12891.2} \end{bmatrix} \quad (111)$$

Para obtener el siguiente producto vamos a sustituir las expresiones para que no sea tan engorroso, por lo que simplificaremos la matriz obtenida hasta este punto de la siguiente forma:

$$T = EB_2 rot x EB_1 x EB_1 x EB_2 rot = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \quad (112)$$

Tendremos que tener en cuenta las propiedades anteriormente planteadas (106)

$$\begin{aligned} T_{11} &= EB2_{11}^2 e^{-j2\pi 13040.24} + EB2_{12}^2 e^{-j2\pi 12891.2} \\ T_{12} &= EB2_{12} (EB2_{11} e^{-j2\pi 13040.24} + EB2_{22} e^{-j2\pi 12891.2}) \\ T_{21} &= EB2_{21} (EB2_{11} e^{-j2\pi 13040.24} + EB2_{22} e^{-j2\pi 12891.2}) \\ T_{22} &= EB2_{12}^2 e^{-j2\pi 13040.24} + EB2_{22}^2 e^{-j2\pi 12891.2} \end{aligned} \quad (113)$$

Podemos observar por lo tanto que:

$$T_{12} = T_{21} \quad (114)$$

Esto es debido a las relaciones ya anteriormente establecidas (105) y (106).

Por último veremos que la matriz round-trip para el caso en el que estamos estudiando la cavidad, es decir el punto dos, será el siguiente:

$$M_{round-trip} = r2 x EB_2 rot x EB_1 x r1 x EB_1 x EB_2 rot = \begin{bmatrix} 0.9T_{11} & 0.9T_{12} \\ 0.8T_{21} & 0.8T_{22} \end{bmatrix} \quad (115)$$

Como podemos observar hemos obtenido una matriz round-trip distinta a la que habíamos obtenido para el caso del primer punto, esto es lógico ya que hemos alterado el orden del producto de las matrices.

Ahora para representar, obtendremos los valores propios de la matriz y veremos los resultados asociados a los mismos.

4.2.3.2 Código y Representación de los valores propios

Código

$$r1 = [1, 0; 0, 1];$$

```

r2 = [0.9, 0; 0,0.8];
lambda=1.342e-6;
r1x = 1;
r1y = 1;
r2x = 0.9;
r2y = 0.8;
%CRISTAL BIRREFRINGENTE 1
d1=5e-3;
nx1=1.75;
ny1=1.73;

%CRISTAL BIRREFRINGENTE 2
d2=10e-3;
nx2=1.7980;
ny2=1.7411;

theta=[0:1:360]*pi/180;
b1x=exp(-i*2*pi*d1*nx1/lambda);
b1y=exp(-i*2*pi*d1*ny1/lambda);
b2x=exp(-i*2*pi*d2*nx2/lambda);
b2y=exp(-i*2*pi*d2*ny2/lambda);
EB1 = [b1x,0;0,b1y];
EB2 = [b2x,0;0,b2y];
%%
salt = 0;
cambia = 0;
nsaltoanterior = 0;
for i = 1:length(theta)
Rp=[cos(theta(i)) -sin(theta(i));sin(theta(i)) cos(theta(i))];
Rn=[cos(theta(i)) sin(theta(i));-sin(theta(i)) cos(theta(i))];
EB2a=Rp*EB2*Rn;
term(:, :, i)= r2*EB2a*EB1*r1*EB1*EB2a;
if i == 1
termeig(:, i)=eig(term(:, :, i));
termeig2(:, i)=eig(term(:, :, i));

else
termeig(:, i)=eig(term(:, :, i));
a = termeig(:, i) - termeig(:, i-1);
amostrar{:, i} = a;
ahaber = abs(a(1,1));
amatriz{:, i} = ahaber;

imag1(1, i) = imag(termeig(1, i));
imag2(2, i) = imag(termeig(2, i));
comp1 = abs(imag1(1, i)-imag1(1, i-1));
comp2 = abs(imag2(2, i)-imag1(1, i-1));
vabst1 = abs(termeig(1, i)-termeig(1, i-1));
vabst2 = abs(termeig(2, i)-termeig(1, i-1));
if comp1 >comp2 && vabst1 > vabst2 && salt == 0
nsaltoanterior = i;
cambia = 1;
salt = 1;
end

if comp1 >comp2 && vabst1 > vabst2 && nsaltoanterior ~= i
salt = 0;
cambia = 0;
end

```

```

%termeigaux(:,i) = termeig(:,i);
if cambia == 1
    termeig2(:,i) = flip(termeig(:,i));
end

if cambia == 0
    termeig2(:,i) = termeig(:,i);
end

end

end

figure()
plot(theta,(abs (termeig2(1,:))).^2)
MinCosa1 = min((abs (termeig2(1,:))).^2);
MaxCosa1 = max((abs (termeig2(1,:))).^2);
MinCosa1;
MaxCosa1;
hold on
plot(theta,(abs (termeig2(2,:))).^2,'r')
MinCosa2 = min((abs (termeig2(2,:))).^2);
MaxCosa2 = max((abs (termeig2(2,:))).^2);
MinCosa2;
MaxCosa2;
xlabel('Ángulo de rotación,\theta(rad)')
ylabel('Pérdidas dependiente a la polarización, \Gamma')
legend('Polarización x','Polarización y')

```

Como podemos observar se tratará del mismo código con la diferencia de que hemos invertido el orden de los productos a realizar

- Representación

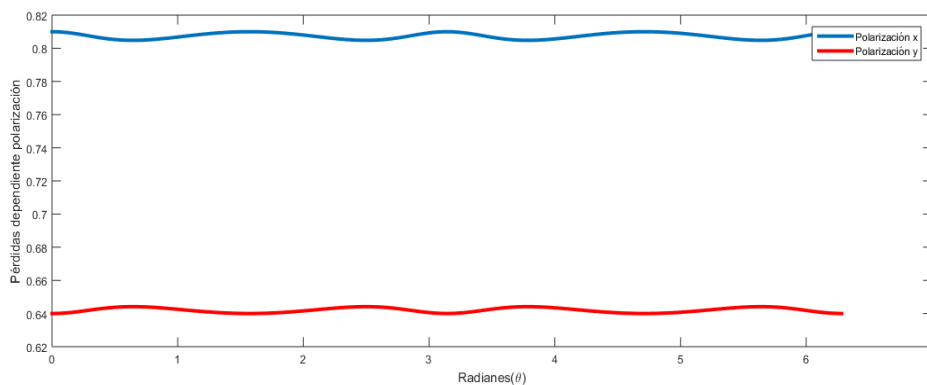


Figura 4.8. Representación de las pérdidas dependientes a la polarización asociadas a la matriz round-trip generada a partir del punto dos

4.2.4 Análisis y comparación de los resultados

Podemos observar claramente que para ambos casos, el comportamiento que presentan sus representaciones gráficas (que estarán asociadas a los valores propios) es el mismo, a pesar de que las matrices round-trip son distintas. Esto será fundamental a la hora de realizar un modelo teórico del comportamiento de una cavidad real, y por lo tanto y

gracias a este resultado, podemos afirmar que el comportamiento de dicha cavidad en su interior es estable. Como podemos ver gracias a las representaciones no tendremos problema al escoger ninguno de ambos puntos con la condicionante de recorrer cada elemento que compone el sistema al menos una vez y además deberemos seguir el mismo sentido de la onda para ambos casos.

Además de todo lo anteriormente explicado, podemos afirmar y validar que lo dicho en el apartado de los valores propios es cierto, ya que en (3.7.2) afirmamos que existirá una estabilidad en el interior de la cavidad y esto es exactamente lo que ocurre para los casos examinados en este apartado.



5. Programa software creado para la obtención del comportamiento de una cavidad con elementos polarizantes

En este apartado analizaremos la realización de un programa software que hemos hecho para que todo lo anterior sea más dinámico, ya que, como hemos podido observar (sobre todo en el apartado anterior), los cálculos matriciales son muy engorrosos y pesados y en un gran número de ocasiones tendremos que utilizar Matlab para el caso de diferentes rotaciones y tensiones introducidas en distintos elementos birrefringentes, este programa también nos ofrecerá la opción de introducir numerosos elementos a nuestra cavidad.

La utilidad real de este programa será la de automatizar todos estos cálculos de una forma sencilla (el usuario solo se encargará de introducir las distintas características deseadas para cada elemento), por lo que esta herramienta obtendrá la modificación que ejerce la cavidad que definamos sobre la polarización de la onda incidente.

Aquí en este punto (además del apartado anterior) es donde encontraremos la utilidad práctica de las Matrices de Jones ya que gracias a estas podremos obtener dichos comportamientos que queremos estudiar.

Adelantándonos a otro punto de este apartado, tenemos que decir que el programa no es perfecto debido a distintas cuestiones que conocemos y explicaremos, pero que en general este mismo sirve para hacernos una idea de cómo se comportará la cavidad estudiada.

Como este apartado estará basado en la realización de una herramienta software con el objetivo de obtener comportamientos de las cavidades y que sean lo más realistas posibles, utilizaremos a parte de los recursos anteriormente mencionados, todos los recursos que nos han sido útiles de [3] ya que estaremos trabajando con el programa de Matlab.

5.1 Diagrama de Flujo y estructura del programa

Para poder hacernos una idea de la estructura global del programa, utilizaremos un diagrama de flujo, este nos ayudará a la hora de visualizar como va a funcionar la herramienta realizada:

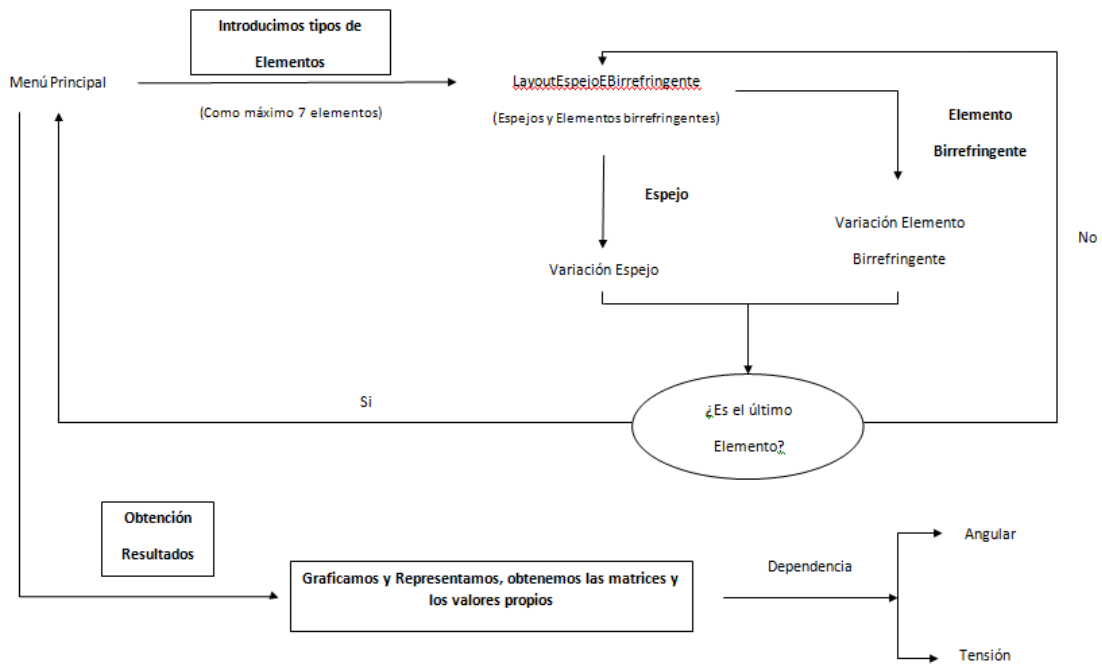


Figura 5.1. Diagrama de flujo que definirá la estructura de la herramienta software creada para la evaluación del comportamiento de la polarización de nuestra cavidad láser

Como podemos observar gracias al diagrama de flujo, teníamos la premisa de realizar un programa para que el usuario lo manejara de manera intuitiva, por ello creamos un menú de inicio (Menú Principal) que tomará ciertos parámetros básicos de la cavidad en los que cabe destacar 2:

- Longitud de Onda
- N° de elementos de la cavidad

Uno analizará a que longitud de onda estaremos trabajando en la cavidad y el otro valor analizará cuantos elementos (ya sea tanto espejos como elementos birrefringentes) se sitúan en dicha cavidad.

Ya introducidos dichos valores pasaremos al menú de selección del elemento, en el que elegiremos entre elemento birrefringente o espejo, dependiendo de lo que queramos. También podremos elegir en qué posición va cada uno de nuestros distintos elementos, por lo que gracias a un útil desplegable implementado, solo tendremos que seleccionar su número asociado, como detalle estará restringido seleccionar un elemento birrefringente como último elemento ya que se trata de una cavidad cerrada.

Para explicar los distintos elementos que componen dicha zona a estudiar, tendremos que usar varias capturas de pantalla (2), una para el caso en el que el elemento sea un espejo y otra donde sea un elemento birrefringente.

5.1.1 Interfaz para la introducción de los datos de los espejos

Primero analizaremos el menú que hemos diseñado para los espejos:

Datos Espejo

rx , ry (Coef.de reflexión)

n0 =

n1 =

θin=

rx =

ry =

Guardar

Figura 5.2. Interfaz gráfica de introducción de las características de los espejos

Tenemos 5 variables disponibles para el espejo, estos serán en orden de izquierda a derecha:

- n_0 : Índice de refracción del medio 0 (fuera del espejo).
- n_1 : Índice de refracción del medio 1 (dentro del espejo).
- θ_{in} : Ángulo de incidencia (Unidades : grados °).
- r_x : Coeficiente de reflexión en el eje x.
- r_y : Coeficiente de reflexión en el eje y.

Estos parámetros son distintas opciones para al final obtener la matriz que defina al espejo que estamos trabajando. Como bien hemos dicho en la expresión (52), se encontrarán tanto los componentes en x del espejo, como los componentes en y, por lo que conociendo el método de cálculo de dicha matriz y sabiendo la relación entre (n_x , n_y) y (r_x , r_y) hacemos que con los datos que introduzca el usuario podamos obtener esa matriz asociada.

Con respecto a θ_{in} cabe resaltar que se tratará de cómo he dicho, de la inclinación en la que incide la onda sobre el espejo, o lo que es lo mismo, como de rotado estará el espejo respecto a la luz incidente.

Todas estas opciones hacen que el mismo programa cambie de método, ya que si selecciona los índices en x e y tendremos que calcular los coeficientes de reflexión y si

existe rotación realizarla, mientras que en el caso de que se introduzcan directamente dichos coeficientes (rx,ry), solo tendremos que calcular la rotación si existe para formar la matriz final del espejo.

Por último guardaremos lo obtenido, este botón es muy importante ya que lo que hace en realidad es aceptar la operación, realizar los cálculos solicitados y guardar dichos resultados de forma interna, por lo tanto al tener que calcular esto, lo que se verá obligado a realizar será a llamar a una función que nos ayudará a calcular en este caso los espejos.

5.1.2 Interfaz para la introducción de los datos de los elementos birrefringentes

Ahora haremos lo mismo para el diseño de los elementos birrefringentes:

Figura 5.3. Interfaz gráfica de introducción de las características de los elementos birrefringentes

Este apartado gráfico contiene una gran cantidad de variables que serán necesarias para obtener una caracterización matricial de los elementos birrefringentes. Si lo comparamos con la interfaz utilizada para los espejos, podemos darnos cuenta de que existen un mayor número de opciones, esto se debe a que se tratan de materiales que afectan directamente a nuestra polarización que como ya hemos ido mencionando a lo largo de todo el trabajo, será la principal característica de la onda a estudiar y determinar.

- nx: Índice de refracción en el eje x.
- ny: Índice de refracción en el eje y.
- sx: Coeficiente electro-óptico en el eje x (unidades en pm/V).
- sy: Coeficiente electro-óptico en el eje y (unidades en pm/V).
- L: Longitud del elemento (unidades en mm).
- d: Espesor del objeto (unidades en mm).

Habrá una secci3n en específico, esta será estudiada posteriormente, y será simplemente un detalle que hemos introducido para que tenga en cuenta otra característica que pueden tener dichos elementos.

Por último definiremos si existe dependencia con la rotaci3n o con la tensi3n (efecto electro-3ptico), este análisis se realizará con independencia en nuestro programa, ya que será muy complicado mezclar variaciones en la rotaci3n con tensiones (Esto estará definido en los problemas encontrados con respecto al programa ya que no será necesario extenderse aquí).

Además de las dependencias hemos introducido una opci3n que fijará el ángulo de inclinaci3n de cada elemento, en el caso de que no se escriba nada se tomará como que no habrá rotaci3n es decir tomaremos un ángulo de 0 .

Lo anterior también es una característica importante a señalar en nuestro programa y es que algunos parámetros aunque no se hayan rellenado, el mismo programa podrá suponer el valor que van a adquirir, mientras que otros (espesor del elemento, longitud del mismo, índices de refracci3n) no se supondrán, ya que serán valores asociados al propio elemento.

Algunos ejemplos en los que supondremos sus valores serán:

- θ

- V

Así como las dependencias que serán nulas en el caso de que no se seleccionen.

Muchos de estos casos de ocurren en el recurso llamado AR (Material antireflectante).

5.1.2.1 Opci3n de AR del elemento

Hemos introducido la opci3n de AR como curiosidad ya que esta presenta ciertas implicaciones en nuestra polarizaci3n. Este valor será seleccionable o no, en el caso de que se rellene un valor de AR y no se haya seleccionado el AR en las opciones del menú no se obtendrá ningún valor resultante a los valores introducidos.

Primero tenemos que tener claro que es el AR, este no es más que un recubrimiento para proteger el laser (fuente laser) de las posibles reflexiones que producirá la cavidad a la onda incidente, por lo que si “impacta” de regreso en la cavidad emisora puede romperse todo el laser. Esta definici3n explica a la perfecci3n el significado real de las siglas AR y es que se tratará de las siglas de “*Anti-Reflective coating*” o lo que es lo mismo, se tratará de un recubrimiento antireflectante.

Este recurso como hemos podido ver, es bastante útil para nuestros sistemas, pero tiene una pega para nuestro estudio y es que dicho material variará respecto al aire y el elemento birrefringente, esto como hemos estudiado anteriormente variará la polarizaci3n de la luz, es bastante curioso ya que a pesar de ser una capa fina delante de

un elemento dentro de una cavidad de bastantes elementos cambia de gran manera dicha polarización, ya que el elemento con el que estará asociado tendrá una polarización de entrada distinta, por lo que este objeto hará la misma variación que haría en el caso que no hubiera AR pero como la entrada es diferente, pues no obtendremos lo mismo a la salida.

Este comportamiento nos recuerda de cierta manera a los elementos birrefringentes, ya que ejercen una variación en la polarización de la luz y de hecho pueden presentar distintos coeficientes de reflexión (x e y) y de hecho estos mismos varían dependiendo del cambio de medio ya que dependen a su vez de los índices de refracción como bien hemos dicho anteriormente por lo tanto existirán dos coeficientes de reflexión (tanto x como y), y por lo tanto 2 matrices asociadas a dicho AR:

Primera matriz:

$$\text{Vacío-ElementoAR: } \begin{pmatrix} r_{x1} & 0 \\ 0 & r_{y1} \end{pmatrix}$$

Segunda matriz:

$$\text{ElementoAR-ElementoBirrefringenteAsociado: } \begin{pmatrix} r_{x2} & 0 \\ 0 & r_{y2} \end{pmatrix}$$

Por último y con relación con lo dicho antes en el primer parrafo del apartado AR, al no producirse la selección del recurso o al darse y no introducir ningún valor tomaremos como valores base la unidad “1”, también ocurriría en el caso de que alguno de los valores de los coeficientes de reflexión no sean introducidos por lo que estos serán sustituidos por la unidad mientras que los que sí satisfagan todas estas condiciones (tanto selección como introducción del mismo valor) obtendrán dicho valor indicado por el usuario.

Elegiremos 1 en todos los valores $(r_{x1}, r_{y1}, r_{x2}, r_{y2})$, cuando no seleccionamos la opción de recubrimiento o en los casos indicados anteriormente, así crearemos una matriz identidad, que como ya sabemos, se trata de la matriz cuya característica es que diagonalmente sean unos y por lo tanto no interfieran en la polarización de la señal.

Señalar que gamma, es decir (γ) será un símbolo que indicará el ángulo en el que incide la onda sobre el recubrimiento, no la hemos definido con anterioridad porque a pesar de que esté fuera del apartado de AR, tiene relación con este mismo, al igual que otros parámetros. En el caso de que no se rellene, se supondrá como 0 o lo que es lo mismo, existirá una incidencia normal sobre el recubrimiento.

Esta característica se ha implementado gracias a que es fácil de incluir, pero hay otras opciones que no hemos incluido en el programa y que los explicaré posteriormente cuando analicemos comparaciones entre resultados reales y teóricos, así como en la conclusión y en las líneas futuras de esta herramienta software.

5.1.2.2 Implementación de la dependencia del efecto electro-óptico

Con respecto a los valores s_x y s_y sabemos que se tratan de los coeficientes electro-ópticos anteriormente mencionados, estos tendrán una asociación directa con los ejes del elemento birrefringente ya que dependiendo de la componente a analizar, afectaran de una manera u otra a las componentes de la matriz de Jones resultante, más específicamente a sus índices de refracción, esta expresión ya la hemos definido en el apartado anterior (60). Por cómo podemos ver en la expresión, al aumentar este valor lo que haremos será aumentar los índices de refracción pudiendo ser entre ambos distintos, es decir, no coincidiendo como es lógico en este tipo de elementos.

Cuando hemos acabado de introducir los datos de cierto elemento de la cavidad, habiéndole dado a guardar, tendremos que seguir introduciendo las características de los distintos elementos de la cavidad, esto es importante porque en el caso de que se cierre sin antes hacer esto tendrá que repetirse otra vez la operación.

Ya definidos todos los componentes de la cavidad seleccionaremos el botón del menú central “Comenzar” dentro del campo representar, este nos llevará a otro desplegable, en este caso será uno que nos dé la opción de representación gráfica y obtención de una expresión general, donde podremos seleccionar una opción, la otra o ambas.

A continuación lo que haremos será definir que quieren decir cada una de las posibilidades que da el programa y las facilidades y utilidades del mismo.

5.1.3 Opciones finales del programa

5.1.3.1 Representación gráfica:

Obtenemos de forma visual una representación de los valores propios anteriormente definidos, esta información reflejará en el caso de que existan ciertas dependencias, ya sean en tensión (voltaje) o por rotación de un elemento (θ), su influencia en los valores de transmitancia de la cavidad (definidos por los valores propios).

La transmitancia que obtendremos en la representación gráfica será el resultado de las variaciones angulares (en el caso de rotación mecánica) o variaciones del voltaje (caso del efecto electro-óptico). Siendo este valor el anteriormente definido en el apartado 3.7, basado en los estudios que hemos obtenido de [6].

5.1.3.2 Resultado General:

La segunda opción que tendremos en este apartado, al seleccionarla y pulsar el botón de “Calcular”, nos dará como resultado cuatro filas de valores, estos representarán cada componente de la matriz Round trip calculada por el programa.

Se tratarán de cuatro filas debido a que las dimensiones de dicha matriz serán de 2×2 como ya hemos mencionado anteriormente.

Se ha pensado minuciosamente que la mejor opción a la hora de exponer el resultado final sean estos valores debido a problemas y cuestiones que se analizarán mejor en el siguiente apartado, siendo este punto crítico en el programa que pretendemos diseñar y muy útil sobre todo a la hora de ver las expresiones de forma global, es decir, de forma simbólica.

5.2 Problemas encontrados

En este apartado hablaremos de ciertos problemas sustanciales que han ocurrido en torno al programa realizado, en algunos casos dichos inconvenientes han afectado a la manera de operar y a los resultados del programa.

5.2.1 Instrucción de valores propios (eigenvalues) en Matlab

Esta función de Matlab “eig”, realiza los valores propios (eigenvalues, de ahí el término “eig”) de cualquier matriz. Este recurso es necesario a la hora de hacer las distintas representaciones de los distintos casos que queremos obtener, por lo que necesitamos que estén adaptados a cualquier valor y a cualquier tipo de variable del sistema, y esto es complicado.

La complicación viene dada no tanto por la función que se supone que tiene que desempeñar, sino como se realiza de forma interna.

Para ello nos apoyaremos en la explicación que hemos hecho en el apartado de “Valores propios”, basándonos en [6] y como fórmula importante en este caso la dada por (66). Como podemos observar gracias a esta expresión existirán dos signos cuando operamos, uno positivo y otro negativo, estos darán como resultado ambos valores propios, pero, Matlab no opera adecuadamente estos valores ya que los invierte y por lo tanto tendremos parte de un valor propio en el otro.

Utilizando una notación sencilla podremos examinar visualmente de que se trata este comportamiento, siendo los dos valores propios:

$$\begin{aligned} x1 &= [x11, x12, x13, \dots, x1n] \\ x2 &= [x21, x22, x23, \dots, x2n] \end{aligned} \quad (116)$$

Matlab obtendría dos vectores pero presentarían la siguiente forma:

$$\begin{aligned} x1 &= [x11, x12, x13, x24, x25, x26, x27, x18, x19, \dots, x1n] \\ x2 &= [x21, x22, x23, x14, x15, x16, x17, x28, x29, \dots, x2n] \end{aligned} \quad (117)$$

Como observamos se intercambian los valores entre los dos vectores, esto es un problema a la hora de la representación, ya que existen saltos donde las gráficas entrecruzan sus resultados, esto hace que la representación no sea cierta, por lo que no nos sirve ni a nosotros ni a alguien que vaya a utilizar el programa.

Este comportamiento se vería de la siguiente forma:

	51	52	53	54	55
..	0.3109 - 0.6...	0.3051 - 0.6...	0.2995 - 0.6...	-0.6815 - 0....	-0.6805 - 0....
..	-0.6836 - 0....	-0.6830 - 0....	-0.6823 - 0....	0.2939 - 0.6...	0.2884 - 0.6...

	127	128	129	130	131
	-0.6805 - 0....	-0.6815 - 0....	0.2995 - 0.6...	0.3051 - 0.6...	0.3109 - 0.6...
	0.2884 - 0.6...	0.2939 - 0.6...	-0.6823 - 0....	-0.6830 - 0....	-0.6836 - 0....

Figura 5.4. Problemática de cambio de filas para los valores propios

Esto produciría gráficamente el siguiente comportamiento:

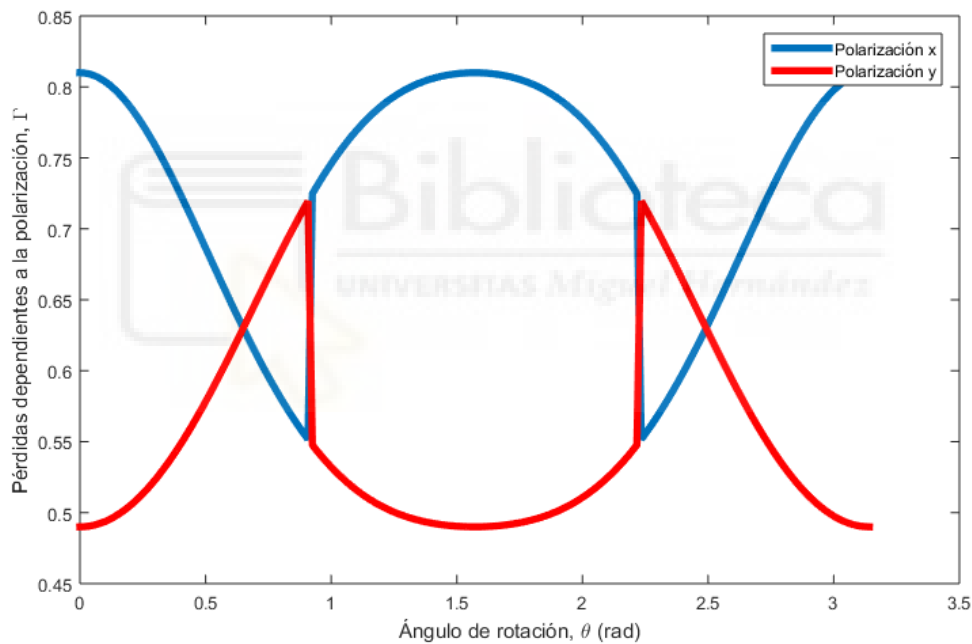


Figura 5.5. Error de la representación gráfica de los valores propios

Como podemos observar en la imagen existe un salto entre representaciones, creando unos resultados erróneos, ya que debería ser continuo. Este error hace que no veamos con claridad los valores propios que queremos analizar además de que el comportamiento no es el correcto.

Quisimos establecer un esquema común para todos nuestros casos, ya que podríamos comparar mejor su comportamiento. Este se trataría de una cavidad de 4 elementos los cuales constatarían de dos espejos un elemento birrefringente independiente y otro sujeto o mejor dicho, dependiente a la rotación.

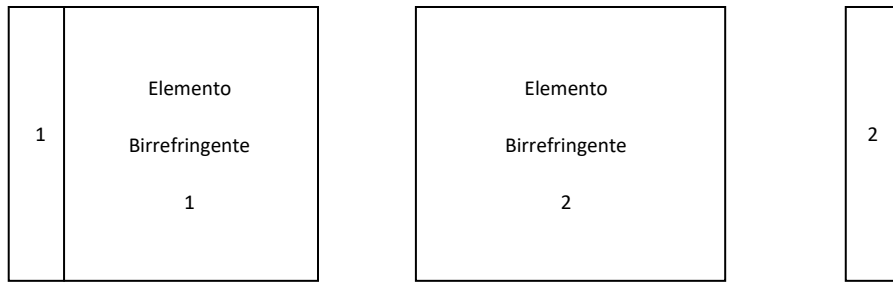


Figura 5.6. Estructura de la cavidad en la que basamos los ejemplos

Ya habiendo postulado la estructura con la que íbamos a trabajar para comparar los distintos métodos y el error que comete matlab en este caso, se nos ocurrió utilizar cierta instrucción de matlab, esta tendría como función que cada vez que cambiaran de valores las filas, lo captase y corrigiese dicho error, por lo que sería ciertamente útil.

La instrucción flip bajo ciertas condiciones podría corregir dichos errores, eso sí, primero habría que ajustarla bien para que realizara lo que queremos que haga, es decir, intercambiar filas de una misma columna.

Para ello expresariamos esta instrucción de la siguiente forma:

$$termeig2(:, i) = flip(termeig(:, i)) \quad (118)$$

El comando anterior indica que cambiemos las filas (:) de una columna indicada i, almacenaremos este resultado en una matriz nueva de las mismas dimensiones que termeig, pero ordenada de forma adecuada.

Después de pensar en esta función, nos preguntamos si había alguna manera de saber cuándo cambiaba de valores y a partir de ahí saber que los siguientes también estaban cambiados, esta función sí que nos dio muchos problemas. Pensamos en condiciones distintas como también en recursos de matlab que presentaban cierta lógica, probamos con “islocalmax” que era una función que captaba los máximos relativos, pero al ser una onda periódica sinusoidal también captaba los máximos absolutos y hacía imposible la implementación del mismo, ya que los máximos que sí que eran válidos de los valores propios los contaba dentro de esta operación que estábamos forzando, cambiando dependiendo del nº de máximos absolutos de dichos valores, esto lo hacía inestable e inaplicable.

En este punto ya nos habíamos dado cuenta de que los saltos que nos hacían imposibles la representación de los valores propios eran los casos impares (1, 3, 5,...) mientras que los casos pares de saltos (2, 4, 6...), “arreglaban” este problema, por lo que separamos los saltos entre nocivos y beneficiosos, esto se puede observar en el ejemplo anterior (Figura 5.5), esta premisa sería fundamental en un futuro pero la dejaríamos un poco apartada. Ahora probaríamos la función “roots”.

Roots no es más que la conversión de una matriz a forma de polinomios, por así decirlo hicimos el cálculo aritmético de los valores propios como si fuera a mano pero en

matlab, paso a paso obteniendo los polinomios para después hacer la raíz y separar resultados y no obtuvimos el resultado que queríamos, el mismo programa giraba las separaciones, esto ya no era debido a eig, sino que matlab al obtener 2 resultados de una raíz cuando llegaban a un punto de convergencia entre ambos valores, se invertían las filas.

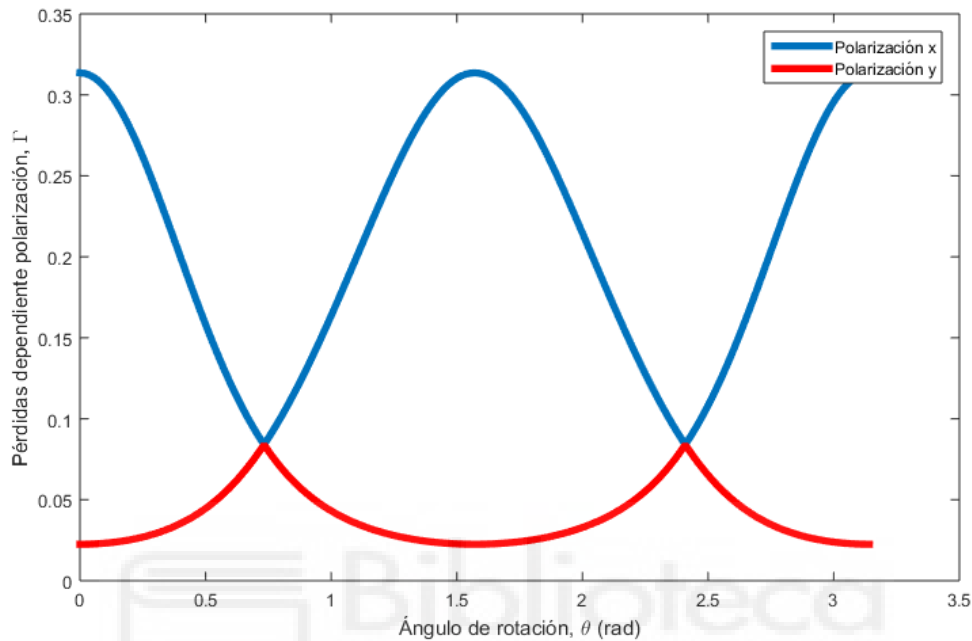


Figura 5.7. Representación Errada de la obtención de los valores propios con su definición

Examinando bien los valores propios intentamos un último caso en el que comparábamos las distintas divisiones entre las partes imaginarias y reales entre sí y viendo las diferencias que presentaban con respecto a las adyacentes y después haciendo el flip, que tampoco nos dieron frutos, ya que habían escenarios que sí funcionaban y otros que no, ya que no realizaba la instrucción de una forma adecuada y no lo llegamos a plantear de forma correcta, en resumidas cuentas, no era el procedimiento a seguir.

Un caso en el que no funcionaba, presentaba dichas características asociadas, este era sencillo de obtener ya que con el esquema general anteriormente definido lo único que variábamos eran los distintos índices y características de cada componente de nuestro espacio de trabajo.

Nuestros datos eran:

-Espejo 1:

$$r1 = [0.3, 0; 0, 0.9]$$

-Espejo 2:

$$r2 = [0.7, 0; 0, 0.4]$$

-Elemento Birrefringente 1:

$$EB_1 = \begin{bmatrix} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_{0x1}l} & 0 \\ 0 & e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_{0y1}l} \end{bmatrix}$$

$$EB_1 = \begin{bmatrix} e^{-j\frac{2\pi}{1342 \cdot 10^{-9}} \cdot 1.73 \cdot 10 \cdot 10^{-3}} & 0 \\ 0 & e^{-j\frac{2\pi}{1342 \cdot 10^{-9}} \cdot 1.75 \cdot 10 \cdot 10^{-3}} \end{bmatrix} \quad (119)$$

$$EB_1 = \begin{bmatrix} e^{-j2\pi 12891.207} & 0 \\ 0 & e^{-j2\pi 13040.238} \end{bmatrix}$$

-Elemento Birrefringente 2:

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$$R(-\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (120)$$

$$EB_2 = \begin{bmatrix} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_{0x2}l} & 0 \\ 0 & e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}n_{0y2}l} \end{bmatrix}$$

$$EB_2 = \begin{bmatrix} e^{-j\frac{2\pi}{1342 \cdot 10^{-9}} \cdot 2.13 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} & 0 \\ 0 & e^{-j\frac{2\pi}{1342 \cdot 10^{-9}} \cdot 2.17 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} \end{bmatrix} \quad (121)$$

$$EB_2 = \begin{bmatrix} e^{-j2\pi 3174.3666} & 0 \\ 0 & e^{-j2\pi 3234} \end{bmatrix}$$

La representación en este ejemplo será por tanto la siguiente:

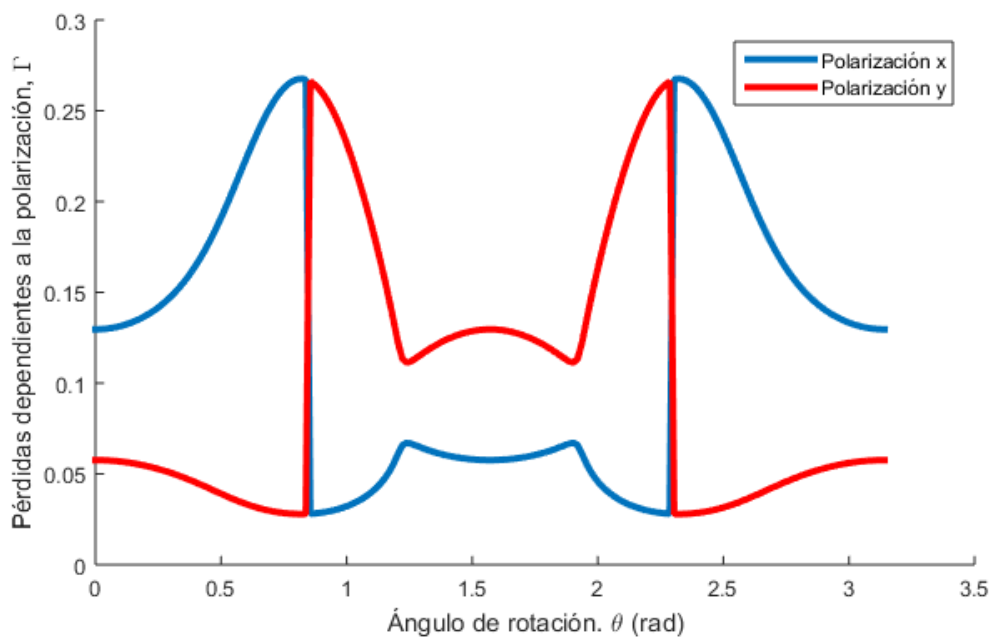


Figura 5.8. Error de la representación con un recurso adicional

Todo esto se solucionaría por un conjunto de conceptos que utilizaba en cada uno de los intentos fallidos anteriores, y que procederemos a enumerar ahora:

- Flip resulta fundamental a la hora de girar la matriz en los casos que se produce ese cambio de filas.
- Los casos que hacen que los resultados no sean los correctos son los impares, los pares rectifican, y no haría falta realizar flip en dichos intervalos.
- Tiene que haber una forma de comparación entre casos adyacentes para ver ciertas diferencias entre una fila y otra.

Entonces se nos ocurrió una solución, y es comparar cada elemento con su anterior, tanto su parte imaginaria como el absoluto, así tenemos una doble verificación.

A partir de la captación del que empieza a realizar el flip, girar todos los posteriores hasta el segundo flip, luego introducir los valores que obtenemos de “eig” y con la tercera volver a hacer el flip, haciendo uso el caso par-impar.

El fundamento radica en que el punto anterior a pesar de que tenga una gran pendiente ya sea de subida como de bajada, estará más cerca respecto al nuevo de su misma fila que uno que haga un salto, esta verificación se sustenta ya que aunque se crucen, estaremos comprobando en 2 partes tanto su valor total como su valor imaginario, esto hará que para que realicemos el giro otra vez se den más casos que cumplir y por lo tanto nunca suceda ya que es muy restrictivo, ahora introduciremos un caso peliagudo para otros métodos y que siempre o casi siempre terminaba en error, este sucede cuando $r1 = [0.3,0;0,0.9]$ y $r2 = [0.7,0;0,0.4]$ manteniendo los mismos valores para los elementos birrefringentes ya que aunque estos varíen la polarización en nuestro caso, los saltos eran producidos fácilmente por las modificaciones de los espejos, por lo que sería más cómodo simplemente variar dichos parámetros:

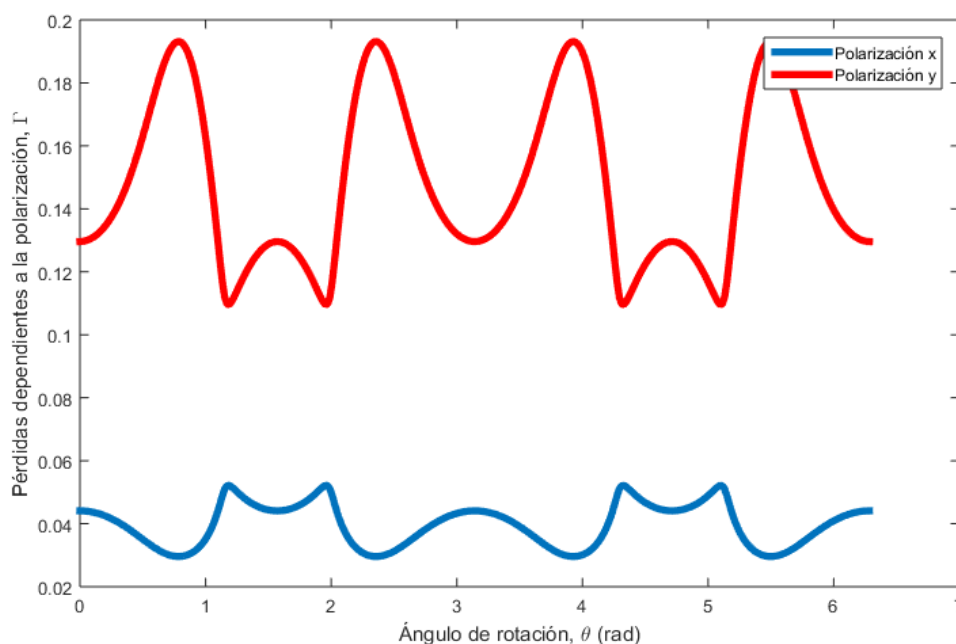


Figura 5.9. Representación correcta de los valores propios

También representaremos un caso en el que se aproximan de gran manera los valores de las filas y veremos a pesar de eso que el flip se ha arreglado. Este caso es igual que el anterior pero tiene la peculiaridad de que los espejos 1 y 2, es decir, el primer y último espejo presentan coeficientes de reflexión opuestos:

$$r_1 = [0.3, 0; 0, 0.9]$$

$$r_2 = [0.9, 0; 0, 0.3]$$

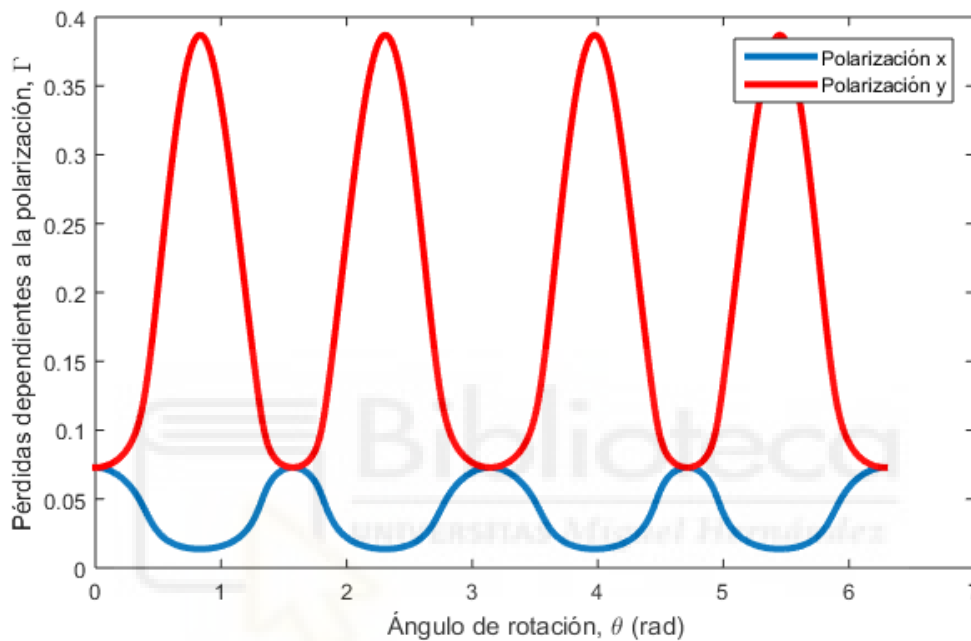


Figura 5.10. Representación correcta de los valores propios caso crítico

5.2.2 Expresión final del programa

Algo que teníamos planeado desde el principio, y como base del programa, era la respuesta de este con una expresión que nos diera información sobre cómo se manipulaba la onda en la cavidad creada y cómo podríamos intuirlo, debido a que tendríamos que representar los valores propios ya que son la mayor fuente de información de los mismos, decidimos antes de realizar el programa que este devolviese los valores propios al usuario.

Realizamos el programa y cuando observamos las distintas expresiones nos dimos cuenta de que era un sin sentido y algo inadecuado, esto es debido a que el programa tiene una capacidad máxima de 7 elementos, con espejos y elementos entre ellos, haciendo que por cada elemento introducido crezca la expresión final (esto siempre que algún elemento dependa de theta o de la tensión), por lo que nosotros al asegurarnos el tamaño máximo de expresión obteníamos 2 valores propios de entorno 8 o más líneas cada uno, haciendo que visualmente careciera de sentido ya que es algo engorroso y además rompería la estética del programa. Para aligerar la carga de líneas decidimos

representar la matriz sin más, ya que es el proceso “eig” el que crea tantas líneas, disminuyendo por lo tanto el resultado final en gran medida y siendo por lo tanto más útil y estético.

De todas formas la obtención de la matriz final de la cavidad nos sigue siendo muy útil, ya que además de esta, hemos obtenido la representación gráfica de los valores propios por lo que tenemos dos métodos de información distintos y que hacen que nuestro programa sea bastante completo a la hora de contrastar la información que obtendremos en los casos reales.

5.2.3 Problema con ciertas cavidades que dependiesen tanto del ángulo de rotación como del efecto electro-óptico

En un principio y como objetivo planteado para este trabajo era crear una herramienta software intuitiva y que mostrase unos resultados que una persona pudiese interpretar con facilidad, para ello se decidió crear gráficas que definieran el comportamiento de la polarización de la onda.

Como ya hemos explicado anteriormente, las representaciones actualmente en el programa, son útiles y capaces de mostrar un gran número de escenarios posibles, pero existía un gran limitante, este se trataba de las representaciones de un elemento que dependiera de la rotación mecánica y otro que dependiera del efecto electro-óptico, es decir, aunque la cavidad presentará cuatro elementos (nº de elementos relativamente bajo) si incluíamos 2 elementos, cada uno con un tipo distinto de dependencia, haría que para el usuario fuese muy complicado entender la representación gráfica a su salida.

Al depender del ángulo rotado y del efecto electro-óptico, tendríamos por lo tanto tres ejes y por lo tanto las representaciones gráficas serían tridimensionales. Esto iría en contra de la primera premisa de nuestro programa y es que tiene que ser una herramienta tanto fácil de utilizar como intuitiva en cada una de sus partes, siendo dicha representación complicada de analizar y no muy necesaria.

Con todo esto al final se decidió eliminar esta posibilidad y solo permitimos que el programa dependiera de la rotación del elemento o del efecto electro-óptico.

5.2.4 Problema con el número de elementos

Otro problema que nos surgió y era fundamental en su solución por lo menos con la estructura que teníamos pensada, fue a nivel de programación.

Cuando en nuestro programa introducimos un número (n) de elementos con valores máximos y mínimos definidos a continuación:

$$2 \leq n \leq 7$$

Observamos que una vez le hayamos dado a “Introducir”, en la siguiente parte del programa, aparecerá un desplegable que será muy cómodo para el usuario a la hora de elegir con que elemento queremos trabajar. Este recurso es muy valioso ya que ofrece

comodidad a la vez que desde el momento que iniciamos esta ventana aparecerá de forma automática.

El problema en este caso residía en que matlab no dejaba introducir en el recurso del desplegable una llamada a la variable anterior y que esta misma se ejecutase durante el inicio de la ventana, esto producía diversos errores con los números, los tamaños del desplegable y en general la integridad del programa. Buscando en foros no se me ocurrió una manera muy eficaz, hablando del rendimiento, para solucionar este problema y solo pudimos hacerlo de una manera, muy sencilla pero que sí que es cierto que quizás consume un poco más de recursos, y era la de importar el resultado obtenido (nº de elementos) en “MenuPrincipal” a un bloc de notas que posteriormente se importará a la siguiente parte del programa.

Sí que es cierto que bloc de notas no es un recurso intrínseco de matlab y que es una mera importación de un número que anteriormente el mismo usuario nos ha facilitado, y además no se produce nada parecido durante todo el programa, con ninguna otra llamada, pero debido al recurso del desplegable la única manera de que sus dimensiones fueran correctas era importar dicho “.txt” durante la ejecución de esa función.



6. Validación de la herramienta software mediante la comparación frente a las medidas experimentales

En este apartado se procede a analizar los resultados que proporciona el programa desarrollado y verificar su validez a partir de los datos experimentales obtenidos en diferentes cavidades láser. Para ello se plantean diversas configuraciones de cavidad, con diversos elementos y longitud de onda de emisión. En todos los casos se evaluará el funcionamiento de un láser de estado sólido en condiciones de onda continua. En trabajos futuros se podría extender el análisis al régimen pulsado para comprobar si la dinámica del láser produce algún tipo de alteración en el estado de polarización de la onda resultante de la oscilación.

Antes de nada es necesario mencionar que al tratarse este apartado de un análisis de comportamientos de cavidades reales, nos será de gran utilidad el análisis de elementos reales con unas composiciones determinadas, para ello nos ha sido de mucha utilidad [4], ya que realiza descripciones de muchos materiales que componen dicha cavidad.

Para evaluar el estado de la polarización y el funcionamiento proporcionado por las cavidades láser propuestas se procederá a registrar los niveles de potencia óptica a la salida de la misma mediante el uso de un fotodetector de alta sensibilidad. En particular, se trata de un fotodetector de avalancha de InGaAs (Thorlabs APD130C) que opera en la banda de trabajo (900 nm – 1700 nm) con una responsividad de 9A/W que permitirá registrar los niveles más bajos de potencia para las componentes de polarización más tenues (alto grado de relación de extinción). Los datos para la verificación de la herramienta software se registran a través su lectura en voltios mediante osciloscopio digital TDS 220 Tektronics, que proporcionarán una medida proporcional a la potencia recibida para su posterior representación gráfica normalizada. Previa a la etapa de detección, se empleará un filtro óptico paso alto a 1000 nm (Thorlabs FEL1000), de manera que elimine cualquier componente espectral residual de la fuente empleada para el bombeo del láser a 808 nm. Las configuraciones de la cavidad láser, determinadas por el medio de ganancia empleado, darán lugar a emisión láser a las longitudes de onda de 1064 nm y 1342 nm. Mediante la utilización de un polarizador a la salida, se determinarán los niveles de potencia asociadas a las correspondientes componentes de polarización. Los elementos ópticos presentes en el interior de la cavidad láser irán montados sobre mecánica calibrada que permita la rotación en torno al eje longitudinal de la cavidad.

En los montajes experimentales que a continuación se presentan se contempla el efecto producido en el estado de la polarización de la oscilación láser mediante el control de las características birrefringentes que presentan los elementos intra-cavidad (en particular, el uso de láminas retardadoras, cristales no lineales o el propio medio de ganancia). Como se ha comentado en anteriores apartados, este control se puede realizar aprovechando la dependencia angular de los elementos de la cavidad mediante la rotación en torno el eje longitudinal de la cavidad (dirección de propagación) y

aprovechando las características electro-ópticas de ciertos materiales para su control mediante la aplicación de un voltaje a través de la colocación de un par de electrodos sobre su superficie. Sin embargo, la validación experimental se limitará únicamente a corroborar las dependencias angulares mediante la rotación de elementos ópticos de la cavidad.

6.1 Montaje experimental 1

En primer lugar se procede a analizar el funcionamiento de una cavidad láser lineal, delimitada por dos espejos, y compuesta por un cristal láser de $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ y un medio birrefringente en su interior (el simulador contemplará 4 elementos). Las características del láser y los espejos empleados se encuentran optimizados para la oscilación a 1064 nm. El espejo de entrada es plano y se encuentra depositado sobre una de las caras del propio cristal láser, presentando alta transmitancia (HT, High Transmittance) a la longitud de onda de bombeo (808 nm) en su cara de entrada, mientras que presenta alta reflectancia (HR, High Reflectance) en su cara interior a la cavidad a 1064 nm. El espejo de salida es plano cóncavo y también presenta HR a 1064 nm y un radio de curvatura de un metro. Respecto al cristal láser, presenta unas dimensiones de $3 \times 3 \text{ mm}^2$ de sección por 4 mm de longitud, con un índice de refracción de 1.95 y 2.16 en las direcciones x e y, respectivamente, a la longitud de onda de 1064 nm. Por último, se introduce un cristal no lineal birrefringente (cristal de titanil fosfato de potasio o KTP, con tratamiento anti-reflexivo en sus caras (AR) a la longitud de onda de emisión) con unas dimensiones de $5 \times 5 \text{ mm}^2$ de sección por 10 mm de longitud, que se encuentra ubicado sobre mecánica que permite controlar la rotación angular del mismo. El cristal presenta índices de refracción con valor 1.82 y 1.74 en las direcciones x e y, respectivamente. La cavidad resultante presenta una longitud próxima a los 100 mm. Como fuente de bombeo se emplea un diodo láser a 808 nm emitiendo una potencia de 700 mW. En la tabla siguiente se resumen los valores introducidos en el programa para su simulación.

<i>Longitud de onda de operación</i>	$\lambda=1064 \text{ nm}$
<i>Reflectancias espejo de entrada</i>	$r_x=1, r_y=1$
<i>Reflectancias espejo de salida</i>	$r_x=0.9, r_y=0.8$
<i>Elemento birrefringente 1 (cristal láser). Elemento fijo, sin rotación</i> <ul style="list-style-type: none"> • Índices de refracción: • Longitud: 	$n_x=1.95, n_y=2.16$ $L = 4 \text{ mm}$
<i>Elemento birrefringente 2 (cristal no lineal KTP). Elemento rotable</i> <ul style="list-style-type: none"> • Índices de refracción: 	$n_x=1.82, n_y=1.74$ $L = 10 \text{ mm}$

• Longitud:	
-------------	--

Tabla 6.1. Resumen de los parámetros que definen la cavidad láser para el montaje experimental 1.

Con objeto de comparar los datos obtenidos experimentalmente con las simulaciones se han normalizado los datos prácticos a los niveles de transmitancia (a su valor máximo dado por una transmitancia de 0.82). En la figura 6.1. se muestran los resultados experimentales y sus correspondientes comportamientos teóricos en función de la componente de polarización x e y. A la vista de los resultados obtenidos, se puede afirmar que en las condiciones de oscilación y configuración de la cavidad implementada el programa reproduce con gran fidelidad el comportamiento experimental obtenido. Cabe señalar que de acuerdo con los datos del espejo de salida que se dispone, no se especifica diferencia de la dependencia del estado de la polarización en x e y, por lo que ello daría una curva de transmitancia plana en función del ángulo de rotación en torno a 0.8, como se ha presentado en situaciones análogas en el apartado de simulaciones del programa.

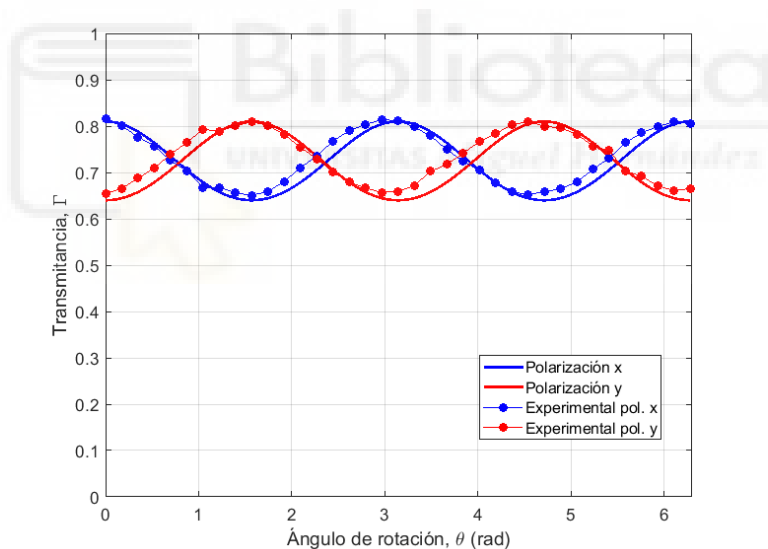


Figura 6.1. Comparación resultados experimentales y simulación para configuración experimental 1 (Tabla 6.1).

Sin embargo, el comportamiento periódico mostrado obedece a la existencia de una ligera diferencia en ambas polarizaciones (como se ha tomado, $r_x=0.9$ y $r_y=0.8$). Atribuimos esa discrepancia a una pequeña diferencia que el fabricante no proporciona, o a la presencia de algún elemento intra-cavidad (oscilación predominante del cristal láser en la componente y) o a la combinación de ambos factores. En todo caso, hay que tener presente que los índices de refracción introducidos en el simulador contemplan un determinado corte cristalográfico y orientación del cristal. Respecto a ésta última, cualquier variación angular o inclinación en la posición del cristal conllevará una

desviación de los índices y por tanto la alteración del estado de polarización con respecto al originalmente concebido. También habrá que tener en cuenta otros factores como el nivel de potencia de bombeo y longitud de la cavidad que afectará al umbral de ganancia y al número de modos axiales que se encuentren oscilando, así como efectos de temperatura que habrá que contemplar de algún modo en sucesivas mejoras de la herramienta.

Por último, hay que mencionar que durante la toma de datos experimentales se observó cierta dependencia de las curvas de polarización con los niveles de potencia de bombeo (y por tanto, de la oscilación láser). Este efecto se muestra en la figura 6.2. Se trata de un efecto que requeriría una investigación más profunda y se deja para líneas futuras del presente trabajo. En la siguiente figura se muestra a modo de ejemplo tal comportamiento para unas potencias de bombeo de 700 mW, 1W y 1.1W.

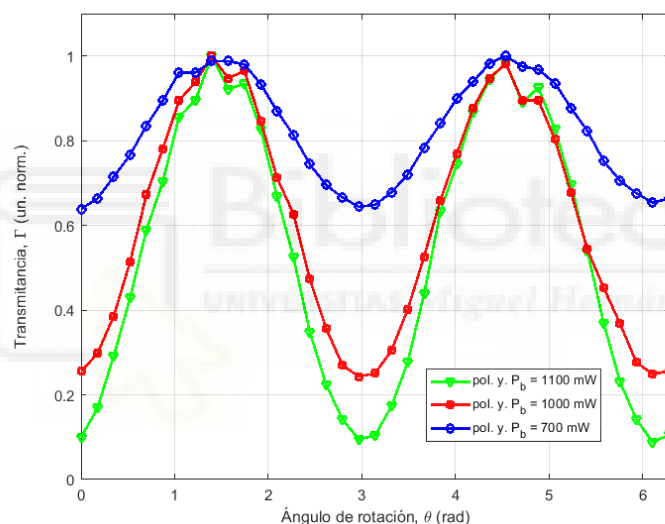


Figura 6.2. Comparación resultados experimentales y simulación para configuración experimental 1 (Tabla 6.1).

6.2 Montaje experimental 2

A continuación, se realiza el análisis del funcionamiento de una cavidad láser lineal compuesta por 5 elementos. La cavidad está delimitada por dos espejos dieléctricos, y compuesta por un cristal láser de $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ y por dos cristales no lineales con características birringentes diferentes en su interior (ambos cristales son detitanil fosfato de potasio o KTP, pero presentan dimensiones y cortes distintos). En este caso, las características del láser y de los espejos empleados se encuentran optimizados para la oscilación a 1342 nm. El espejo de entrada es plano y se encuentra depositado sobre una de las caras del propio cristal láser, presentando alta transmitancia HTa la longitud de onda de bombeo (808 nm) en la cara de entrada, mientras que su cara interior

presenta un tratamiento HR a 1342 nm. El espejo de salida es plano cóncavo y también presenta HR a 1342 nm (reflectancia del 95%) y un radio de curvatura de tres metros. Respecto al cristal láser, presenta unas dimensiones de 3x3 mm² de sección por 5 mm de longitud, con un índice de refracción de 1.91 y 2.12 en las direcciones x e y, respectivamente. Por último, se introduciendo cristales no lineales que habitualmente se emplean para generación y suma de frecuencias ópticas intra-cavidad, pero que en el montaje experimental se explotarán sus características birrefringentes para el control de la polarización de la oscilación láser. Ambos cristales presentan tratamiento AR en sus caras lo que simplificará también la simulación del comportamiento de la polarización. El primer cristal presenta unas dimensiones de 5x5 mm² de sección por 10 mm de longitud, y se ubica en una pieza mecánica que permite la rotación angular del mismo para el control del estado de la polarización. El primer cristal de KTP presenta índices de refracción con valor 1.79 y 1.74 en las direcciones x e y, respectivamente. El segundo cristal de KTP tiene una sección de 3x3 mm² y una longitud de 5 mm y permanecerá en una posición fija durante toda la toma de medidas experimentales. Este segundo cristal de KTP presenta índices de refracción con valor 1.82 y 1.73 en las direcciones x e y, respectivamente. La cavidad láser resultante presenta una longitud total de 140mm. En la tabla 2 se muestran los valores introducidos en el programa para su simulación.

<i>Longitud de onda de operación</i>	$\lambda=1342$ nm
<i>Reflectancias espejo de entrada</i>	$r_x=1, r_y=1$
<i>Reflectancias espejo de salida</i>	$r_x=0.90, r_y=0.95$
<i>Elemento birrefringente 1 (cristal láser). Elemento fijo, sin rotación</i> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Índices de refracción:</i> • <i>Longitud:</i> 	$n_x=1.91, n_y=2.12$ L = 5 mm
<i>Elemento birrefringente 2 (cristal no lineal KTP 1). Elemento rotable angularmente</i> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Índices de refracción:</i> • <i>Longitud:</i> 	$n_x=1.79, n_y=1.74$ L = 10 mm
<i>Elemento birrefringente 3 (cristal no lineal KTP 2). Elemento fijo, sin rotación</i> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Índices de refracción:</i> • <i>Longitud:</i> 	$n_x=1.82, n_y=1.73$ L = 5 mm

Tabla 6.2. Resumen de los parámetros que definen la cavidad láser para el montaje experimental 2.

A diferencia del caso anterior, en este segundo caso presentado se observan discrepancias significativas entre la simulación y los datos experimentales obtenidos. De nuevo, obviando las posibles diferencias entre los valores de reflectancias reales y las que proporciona el fabricante, y los valores de los índices de refracción de los materiales (obtenidos mediante las expresiones de Sellmeier) pasamos a investigar las causas. Por un lado, la longitud de la cavidad resultante de unos 140 mm de longitud en

un láser formado por espejos de alta reflectancia puede dar lugar a la oscilación de múltiples modos axiales distribuidos en una en torno a la longitud de onda de diseño, de manera que la birrefringencia que experimentan los medios debido a la variación de longitud de onda sea distinta con respecto a la de diseño a 1342 nm.

Siguiendo con las posibles causas asociadas al cristal láser, hay que señalar que el cristal no cuenta con un control de temperatura que ayude a disipar el exceso de calor producido por el bombeo. Únicamente cuenta con la mecánica propia para la sujeción y disipación ambiental. Como consecuencia, podrían aparecer efectos de lente térmica responsables de fluctuaciones en la dinámica del láser, y por tanto de los niveles de potencia asociados a cada polarización a la salida del mismo. Además de los niveles de bombeo, como se mostró en la figura 6.2, la deriva en el funcionamiento esperado también podría estar sujeta a la dependencia con la concentración de iones Nd^{3+} % at. del medio de ganancia.

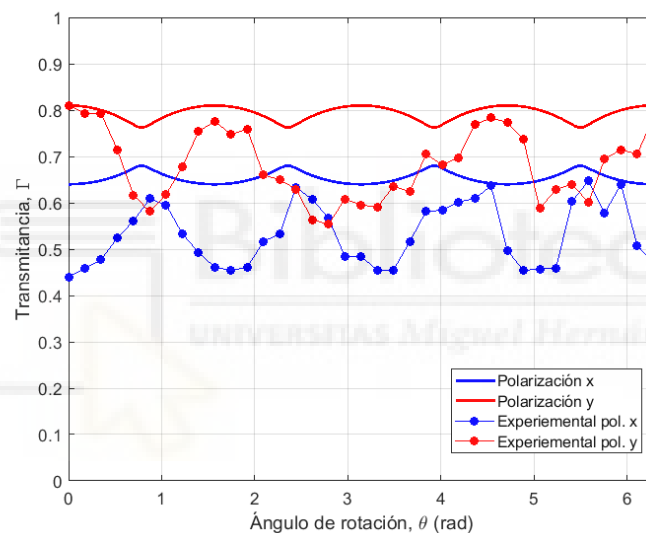


Figura 6.3. Comparación resultados experimentales y simulación para configuración experimental 2 (Tabla 6.2).

Y por último, hay que señalar la complejidad que conlleva la perfecta alineación de los diversos elementos ópticos dispuestos en cascada en el interior de la cavidad láser. Idealmente, han de ubicarse de manera que sus caras estén perpendiculares al haz láser en su propagación de ida y vuelta (*round-trip*), ya que cualquier inclinación provoca cierta desviación del haz por refracción (aun manteniendo la oscilación láser) variando los caminos ópticos y que el detector mida correctamente los niveles de potencia. Este efecto se ve incrementado cuando rotamos angularmente uno de los elementos birrefringentes intra-cavidad en torno al eje de la cavidad. Dado las dimensiones de la cavidad y la concatenación de tres elementos birrefringentes (cristal láser y dos cristales no lineales) en su interior, creemos que la rotación de uno de ellos en un láser cuyos elementos no están perfectamente alineados resulta la principal fuente u origen de

discrepancia respecto a la solución teórica que proporciona el simulador. Otro factor a tener en cuenta, es que los cristales presentan un determinado índice de refracción para una orientación dada a partir de los cortes cristalográficos (dados en función de los ángulos θ y φ). Cualquier desviación en inclinación o rotación en su ubicación en el interior de la cavidad hará que varíen los índices de refracción en x e y, y por tanto, se verá modificado el estado de la polarización resultante.





7. Conclusiones y líneas futuras

En este trabajo se ha desarrollado una herramienta software para simular y predecir el estado de la polarización de la oscilación láser que tiene lugar en cavidades compuestas por múltiples elementos ópticos. Existen muchas aplicaciones que requieren un control del estado de la polarización de la emisión láser. Sin embargo, cuando se implementan láseres de estado sólido es muy habitual que además del medio de ganancia activo y los espejos que delimitan la cavidad resonante contengan otros elementos ópticos auxiliares para adaptar la emisión láser a las características de la aplicación y que pueden alterar el estado de polarización provocando pérdidas adicionales no contempladas. A lo largo de este trabajo se han presentado los distintos elementos que pueden alterar el estado de la polarización del campo eléctrico que se propaga a través de ellos, fundamentalmente debido a las características de birrefringencia de los mismos. Todos ellos se han modelado bajo el formalismo de las matrices de Jones y su aplicación en cavidades resonantes proporcionará la transmitancia de la cavidad láser a partir de la determinación de los valores propios. El programa contempla la implementación y simulación de cavidades láser de hasta 7 elementos entre espejos y elementos ópticos birrefringentes. Permite controlar el estado de la polarización de la cavidad mediante la selección y rotación angular de determinados elementos, así como un control más fino aprovechando sus propiedades electro-ópticas. Cada elemento queda caracterizado por índices de refracción, coeficientes electro-ópticos, reflectividades, tratamientos dieléctricos, dimensiones geométricas y longitud de onda de operación. La herramienta se ha implementado en MATLAB ofreciendo una interfaz gráfica al usuario para simplificar y agilizar la introducción de los parámetros que definen cada uno de los elementos ópticos. Finalmente, se verifica el funcionamiento con diversos montajes experimentales tomados en el laboratorio de Sistemas Fotónicos de la UMH.

Respecto al funcionamiento del programa, contempla la visualización de las componentes en x e y del estado de polarización de la onda obtenida a la salida de la cavidad. La interfaz proporciona información en función del ángulo de rotación del elemento intra-cavidad seleccionado, o para una posición angular dada, la posibilidad de realizar un ajuste fino mediante la aplicación de voltaje de control externo. Sin embargo, esta última opción no se ha verificado experimentalmente, por lo que se decide dejar como una de las futuras líneas de trabajo. Del mismo modo, se aprecia que a medida que aumentamos el número de elementos intra-cavidad que compone el láser los tiempos de ejecución se vuelven largos, del orden de varios minutos. Este comportamiento sugiere la optimización del código como línea futura de desarrollo en nuevas versiones del programa. Igualmente, el desarrollo del código permitió identificar que el tipo de configuraciones que da lugar proporciona matrices de la cavidad (round-trip o de oscilación completa) mal condicionadas con singularidades. Como resultado se obtienen representaciones en las que se intercambian de forma errónea las componentes del estado de la polarización dando lugar a interpretaciones erróneas del comportamiento de la cavidad. Este problema tiene su raíz en la forma en la que MATLAB proporciona los valores propios de este tipo de matrices. Esta incidencia se

resolvió satisfactoriamente mediante implementación y depuración de nuevas funciones auxiliares.

En relación con los resultados que proporciona el programa mediante la interfaz gráfica se verifica el funcionamiento con resultados experimentales para cavidades láser operando en distintas longitudes de onda y diferente número de elementos. Se comprueba que los resultados proporcionados por la herramienta se ajustan en general a los experimentales para cavidades de 3 y 4 elementos. A partir de este número, los comportamientos comienzan a diferir. Tras la investigación experimental se llega a la conclusión que existen diversos factores que causan dicha desviación y que se intensifica con el número de elementos. Dejando de un lado el efecto mínimo de diferencias entre el valor real y el que proporcionan los fabricantes, se determina la influencia del correcto alineamiento de los componentes ópticos en el interior de la cavidad, que se intensifica con el número de elementos ubicados en cascada. Ello se debe a que cualquier inclinación o variación angular se traduce en una variación del índice de refracción (respecto al introducido en el programa) y de la trayectoria del haz por el efecto de refracción. Este último comportamiento puede ocasionar a su vez que el haz no incida completamente sobre la superficie del fotodetector empleado provocando medidas erróneas. Por tanto, resulta esencial un correcto alineado de los elementos ópticos en las configuraciones experimentales implementadas. Por otro lado, otro comportamiento que se aleja del resultado teórico se observa en configuraciones con cavidades formadas por espejos con altas reflectancias y altos niveles de bombeo. Ello posibilita altos niveles de ganancia que permite umbrales de oscilación bajos, dando lugar a la oscilación de múltiples modos axiales que difieren de la longitud de inicial de diseño, contribuyendo a un comportamiento aleatorio según el modo que participe en un determinado instante. A medida que la longitud de la cavidad aumenta, el número de modos axiales es mayor. Por otro lado, también se aprecia la dependencia con el nivel de potencia de bombeo. En este sentido, la utilización de altos niveles de potencia puede inducir efectos de lente térmica que también contribuyan a un comportamiento alejado del teórico proporcionado por el programa. Como línea de futuro también se plantea la investigación de cómo influyen los niveles de potencia de bombeo y los efectos de lente térmica en estado de la polarización de la oscilación láser. Para ello se modificará el código y la interfaz del programa para contemplar dichos efectos y obtener respuestas más precisas. Con relación a este último punto mencionado, tendremos en cuenta la sencillez y queremos mantener ese factor que hace al programa intuitivo en futuras versiones, ya que no pensamos despegarnos de esta premisa ya establecida desde el principio de nuestro diseño, haciendo que el usuario pueda introducir más variables, características y valores pero no por ello creando un programa muy complicado para el usuario.



Anexos

- MenuPrincipal.m: Código del menú principal de nuestro programa software, donde elegiremos características como longitudes de onda o número de elementos de la cavidad, también tendrá la función de poder acceder al menú de elección de los elementos de la cavidad o al menú de obtención de resultados.
- LayoutEspejoEBirrefringente.m: Función que tendrá asociada una interfaz en la que decidiremos si introducimos un elemento birrefringente o un espejo además de su posición en la cavidad.
- VariacionEspejoBien.m: Función que tendrá asociada una interfaz con la que se escogerán las características del espejo seleccionado, (índices de refracción, coeficientes de reflexión y ángulos de incidencia).
- ElementoBirrefringente.m: Interfaz con la que se escogerán las características del elemento birrefringente así como opciones adicionales (AR, Capa “Anti-reflejante”) o si introducimos una rotación mecánica o por el contrario seleccionamos un efecto electro-óptico en cierto elemento.
- ObtencionMatrices.m: Función que obtendrá las matrices de Jones de los distintos elementos que componen la cavidad (espejos y elementos birrefringentes), esta función dependerá de la forma en la que accedamos, siendo los dos puntos de entrada los asociados con los dos tipos de elementos anteriormente mencionados (Espejos y Elementos Birrefringentes) “VariacionEspejoBien.m” y “ElementoBirrefringente.m” respectivamente.
- RepresentaciónyObtención.m: Función que tendrá dos opciones, la primera siendo la representación gráfica de los valores propios y el segundo caso siendo el resultado general de la matriz roundtrip. También cabe destacar que en esta función se realizará tanto el cálculo de la matriz roundtrip (realizando el producto ordenado de las distintas matrices de Jones asociadas a los elementos de la cavidad), así como la obtención de los valores propios.

Bibliografía

- [1] J.Campany, J.Javier Fraile-Peláez, and J.Martí, *Dispositivos de Comunicaciones Ópticas*. Madrid: Síntesis, 1999.
- [2] Bashaa E.A. Saleh and Malvin Carl Teich, *Fundamentals of Photonics*. Londres, Inglaterra: WILEY, 1991, ISBN : 0-471-83965-5.
- [3] Ting-Chung Poon and Taegeun Kim, *ENGINEERING OPTICS WITH MATLAB*. Londres, Inglaterra: World Scientific, 2006, ISBN 981-256-872-7.
- [4] Walter Koechner, *Solid-State Laser Engineering*, Sexta edición ed., W.T.Rhodes, Ed. Nueva York, Estados Unidos de América: Springer, 2006 , ISBN-10: 0-387-29094-X.
- [5] José Capmany, F.Javier Fraile.Peláez, and Javier Martí, *Fundamentos de Comunicaciones Ópticas*, Segunda edición ed. Madrid, España: Síntesis, 2001, ISBN: 84-7738-599-8.
- [6] Norman Hodgson and Horst Weber, *Laser Resonators and Beam Propagation*, Segunda edición ed. Nueva York, Estados Unidos de América: Springer, 2005, ISBN-10: 0-387-40078-8.
- [7] (2022, Dec.) MathWorks. [Online]. <https://es.mathworks.com/help/matlab/ref/eig.html>
- [8] (2022, Dec.) MathWorks. [Online]. <https://es.mathworks.com/help/matlab/ref/flip.html>