



ACADEMIA MEXICANA
DE ÓPTICA, A.C.



Explorando en la Óptica, ACADEMIA MEXICANA DE ÓPTICA, A.C.

Edición especial celebrando el 2015 Año Internacional de la Luz.

Medición de la polarización de la luz

Neil C. Bruce y Juan Manuel López Téllez

neil.bruce@ccadet.unam.mx, jml.56@hotmail.com

Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Resumen: La polarización de la luz es un campo de estudio muy desarrollado. Sin embargo, los nuevos avances en la tecnología de la instrumentación óptica requieren de nuevas técnicas de medición. En particular, los dispositivos basados en cristales líquidos están abriendo nuevas aplicaciones para la medición de la polarización.

Introducción

La luz es una onda vectorial electromagnética, con una amplitud y una dirección de un campo eléctrico y un campo magnético en cada punto del espacio [1]. Las ecuaciones de Maxwell relacionan los campos eléctricos y magnéticos; con ellas conoceremos la dirección y amplitud del campo magnético si sabemos la amplitud y dirección del campo eléctrico. Al comportamiento de la dirección y amplitud del campo eléctrico con la propagación de la onda se le conoce como *polarización* de la luz [2]. Algunos ejemplos de polarización son (ver la Figura 1): polarización lineal, en donde el vector de campo eléctrico oscila siempre en el mismo plano; polarización circular, en donde el vector de campo eléctrico gira alrededor de un eje paralelo al vector de onda, que indica la dirección de propagación del haz, realizando un giro completo en la distancia de la longitud de

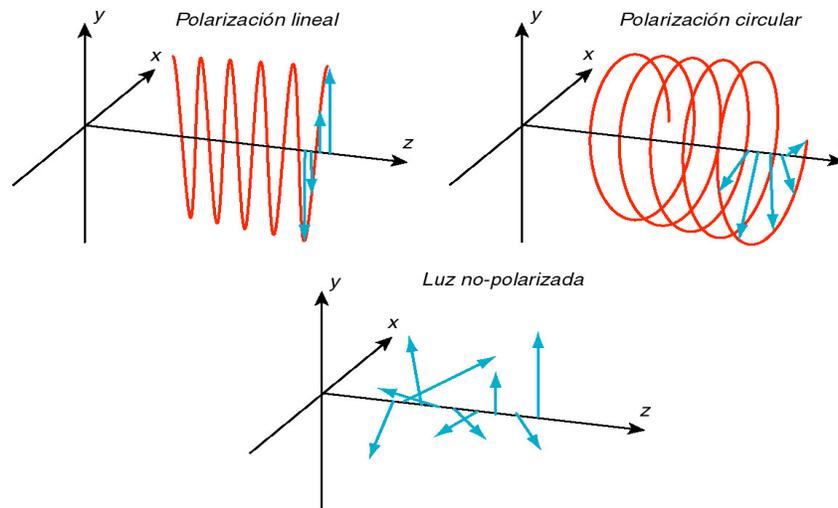


Figura 1: Diferentes tipos de polarización de la luz. Las líneas azules indican el campo eléctrico en un instante y las líneas rojas la trayectoria del extremo del vector del campo eléctrico.

onda de la luz (del orden de 550 nm, en donde $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$, considerando que la luz visible abarca el rango de 400nm (azul) a 700nm (rojo)); y luz no-polarizada, en donde no hay una dirección preferencial para el vector de campo eléctrico y la polarización cambia aleatoriamente con el tiempo y posición. Este último caso es conocido también como luz natural, porque es el caso de la luz del sol, y también de cualquier otra fuente térmica.

Para describir la polarización, se puede descomponer el campo eléctrico en dos componentes perpendiculares [1,2], ver la Figura 2. En esta descripción hay cuatro parámetros: la amplitud de cada componente y la fase de cada componente. Como la fase absoluta no es importante, solo se requiere la diferencia de fase de las dos componentes, y no sus respectivos valores absolutos, reduciendo el número de parámetros a tres. Para incluir el caso de luz no polarizada, se requiere también incluir la intensidad total del haz, lo que significa que, para describir cualquier estado de polarización necesitamos cuatro parámetros. Otra forma de ver esto es, que para medir completamente la polarización de un haz, tenemos que medir estos mismos cuatro parámetros. Hay varias formas matemáticas para escribir estos cuatro parámetros, pero los más comunes son el formalismo de Jones (no válido para luz no-polarizada) [3,4] y los parámetros de Stokes [5].

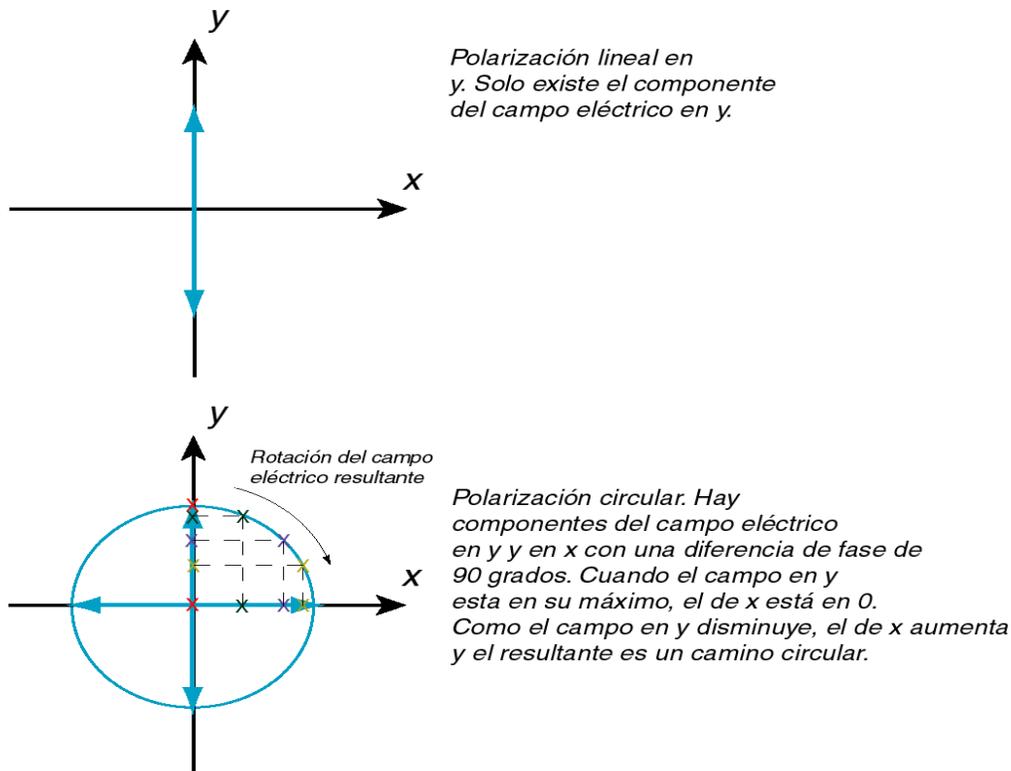


Figura 2: La descomposición del campo eléctrico total en dos componentes perpendiculares.

Medición de la polarización

La medición de la polarización de la luz tiene muchas aplicaciones, por ejemplo, se puede utilizar para diferenciar objetos dentro de una escena [6], medir el esparcimiento en la atmósfera para detectar contaminantes [7], o detectar imperfecciones en superficies de obleas de silicio para construcción de circuitos impresos [8]. Los detalles del comportamiento de la polarización dan más información que la intensidad sola.

¿Cómo se mide la polarización de un haz de luz? Hay que medir los cuatro parámetros mencionados arriba, u otros parámetros relacionados. Por ejemplo, el método de Stokes describe la polarización de la luz en términos de cuatro intensidades, que son medibles. Para esto se requieren cuatro mediciones [2,9]. Dos de estas mediciones se realizan con un polarizador, que separa la intensidad

de luz polarizada en una sola dirección, con el eje óptico de transmisión paralelo a cada una de las direcciones de las componentes de la Figura 2. Para medir la diferencia de fase entre las dos componentes se requiere la medición de polarizaciones con dos diferencias de fase conocidas, ver la Figura 2, típicamente se utiliza el caso de una diferencia de fase de 0° , que es la polarización lineal, a 45° con respecto a las dos componentes medidas con los polarizadores, y con una diferencia de fase de 90° , que es el caso de polarización circular. La diferencia en intensidades de estas dos mediciones permite la medición de la diferencia de fase real de las dos componentes.

Para estas mediciones se requieren dos elementos ópticos de polarización, un polarizador lineal y un retardador de fase, que agregan una diferencia de fase entre las dos componentes de la luz. La diferencia de fase generada por los dos componentes agregados se llama *retardancia*. Además, es necesario que estos elementos tengan la capacidad de girar a diferentes ángulos para poder realizar diferentes mediciones. Las rotaciones se pueden realizar a mano o con un control de motores. También, se puede utilizar estos mismos elementos girando continuamente, y no solo en las posiciones descritas en el párrafo anterior. En este último caso, se pueden obtener muchas mediciones de diferentes combinaciones de diferencias de fases entre las dos componentes de la luz, dando así una medición de la polarización original más precisa y estable.

Nuevas técnicas de medición

La idea de girar continuamente los elementos ópticos para obtener una mejor medición de la polarización ha tenido muchas aplicaciones, pero tiene limitaciones también [2]. Principalmente, rotar un elemento óptico requiere el uso de un motor que causa vibraciones en monturas y elementos ópticos cercanos, lo cual podría ser muy problemático para algunas aplicaciones. También, la velocidad de rotación, y la adquisición de los datos requeridos, está limitada por el problema de vibraciones y estabilidad del sistema mecánico. Es por esto que recientemente se han utilizado retardadores variables de materiales electro-ópticos, magneto-ópticos, o celdas de cristales líquidos para obtener una variación continua de la diferencia de fase entre las dos componentes de la luz. Estos elementos no

requieren rotación mecánica, debido a que la variación de la diferencia de fase proviene de una variación del voltaje aplicado. Estas variaciones pueden ser muy rápidas, del orden de microsegundos o menos, y no causan ninguna vibración en el sistema óptico.

La relación entre el voltaje aplicado y la retardancia obtenida en cristales líquidos es no-lineal, ver la Figura 3. Esto ha significado que, en la literatura, se utilicen combinaciones de voltajes fijos para obtener las mediciones de la polarización de la luz [10]. Utilizando voltajes que varían continuamente, por ejemplo como una función sinusoidal, que es la forma más común, se obtienen retardancias que no varían como una sinusoidal, por la no-linealidad en la respuesta de los cristales líquidos. La respuesta no-sinusoidal de la retardancia complica mucho el análisis de la señal detectada y su relación con la polarización de la luz.

En nuestro grupo de trabajo en el CCADET de la UNAM hemos medido con mucha precisión la relación entre el voltaje aplicado y la retardancia de las celdas de los cristales líquidos [11] y hemos desarrollado métodos para incorporar el conocimiento de esta relación en la medición de la polarización de un haz de luz [12]. Estos nuevos métodos tienen la ventaja de que utilizan más estados de polarización en la medición, por los muchos valores de retardancia en las celdas de cristal líquido, con lo que se obtiene una medición más estable y precisa.

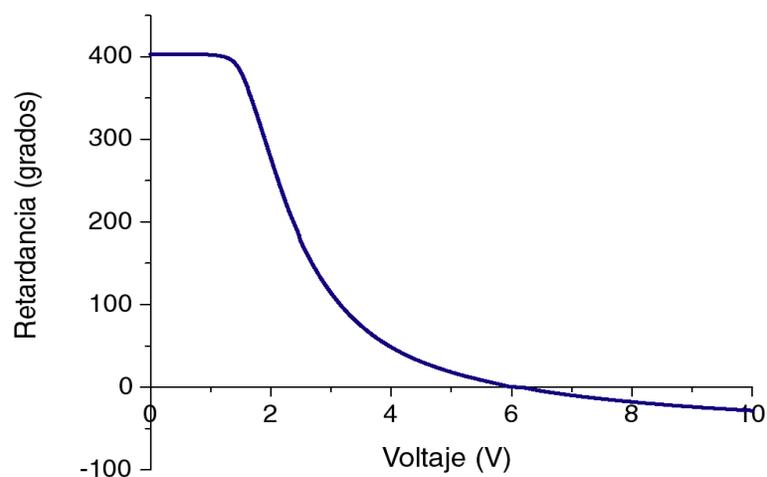


Figura 3: Relación entre el voltaje aplicado a una celda de cristales líquidos y la retardancia obtenida para la luz de un láser rojo (longitud de onda de 632 nm).

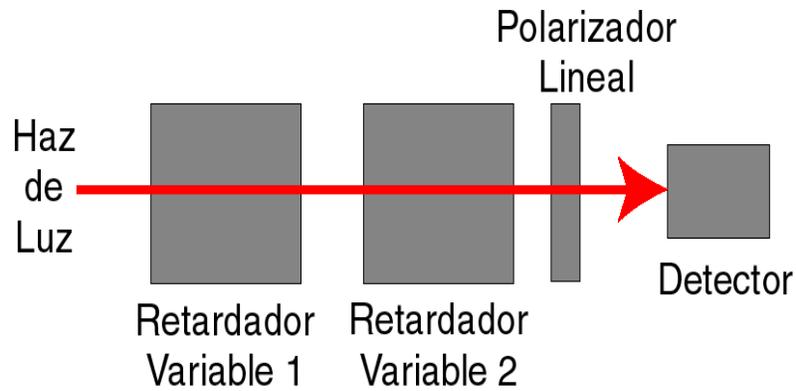


Figura 4: Arreglo experimental para medir los parámetros de Stokes de un haz de luz.

La Figura 4 muestra el arreglo experimental para medir los parámetros de Stokes de un haz de luz, la Figura 5 es una fotografía del arreglo experimental que construimos, y la Figura 6 muestra un ejemplo de medición para un haz con diferentes estados de polarización conocidos para verificar el método. Todavía hay

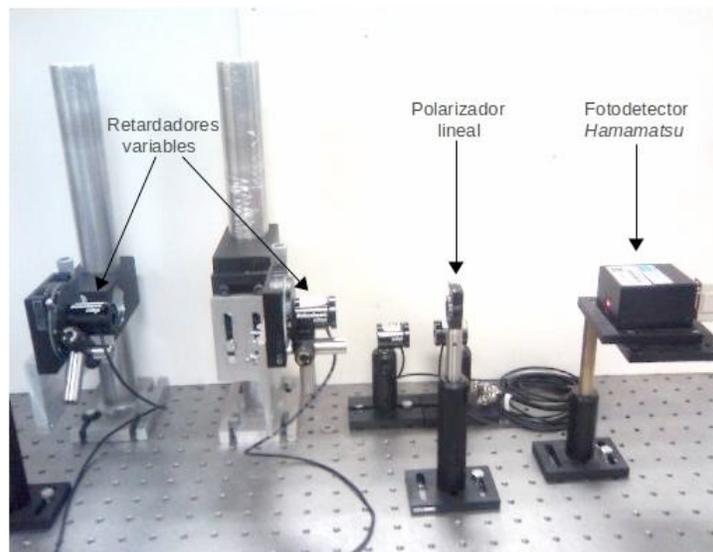


Figura 5: Una fotografía del arreglo experimental que construimos para medir los parámetros de Stokes de un haz de luz.

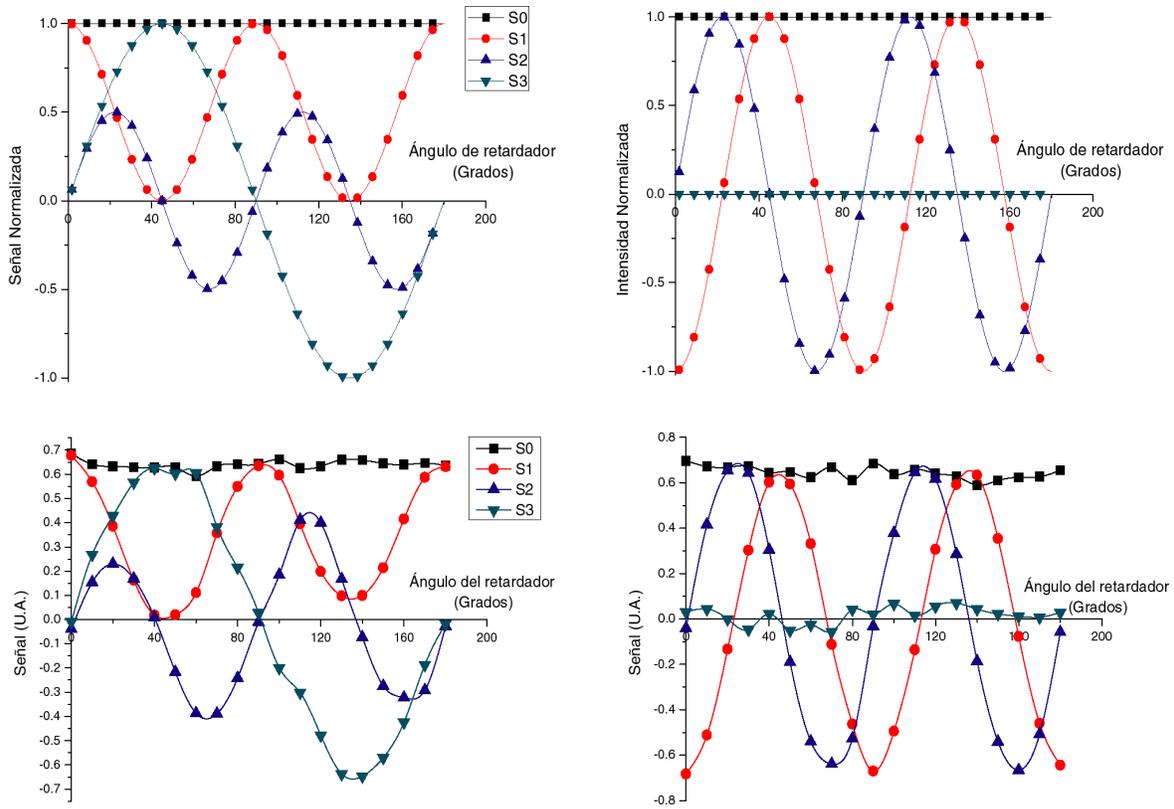


Figura 6: Parámetros de Stokes obtenidos utilizando un retardador de un cuarto de longitud de onda (izquierda) y un retardador de media longitud de onda (derecha) en la fuente de luz, para producir diferentes estados de polarización. Las curvas de arriba son los valores teóricos. Las curvas de abajo son nuestras mediciones.

algunos problemas técnicos por resolver en estas mediciones, entre los cuales se encuentra: reducir el tiempo de medición lo más que se pueda, para poder realizar rápidamente un estudio que requiera mediciones en distintas posiciones del detector con respecto a una muestra, como por ejemplo en el patrón de esparcimiento de una superficie rugosa, que es nuestra aplicación [13]; también, se investiga acerca de la aplicación de voltajes continuos que eviten cambios bruscos en la retardancia los cuales inducen errores en las mediciones; finalmente, se busca desarrollar nuevas formas de calibración de los sistemas de medición más robustas y sencillas para eliminar efectos negativos inducidos por

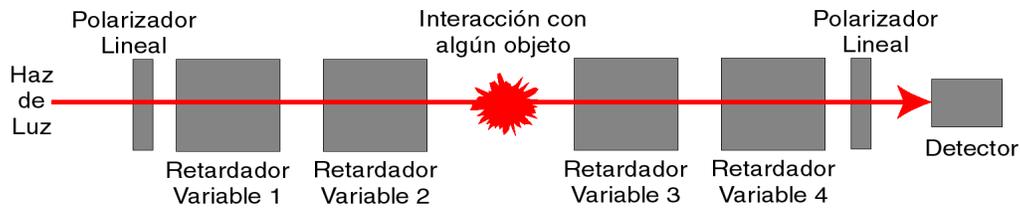


Figura 7: Arreglo experimental para medir los parámetros de Mueller de un objeto que interactúa con el haz de luz.

defectos en la fabricación de los componentes ópticos o errores en la alineación de estos componentes.

Finalmente, además de medir la polarización de un haz de luz, es importante poder medir el efecto que tiene, sobre la polarización, la interacción de la luz con un objeto, componente o sistema. Se puede mostrar que, para medir este efecto se requiere la medición de 16 parámetros (que son los elementos de la matriz de Mueller). Se pueden medir estos 16 parámetros con las mismas técnicas descritas arriba. La Figura 7 muestra el arreglo experimental para realizar estas mediciones, la Figura 8 muestra el arreglo experimental para medir la matriz de Mueller, y la Figura 9 muestra un ejemplo de medición utilizando un objeto conocido como muestra de estudio: un polarizador lineal rotando [14].

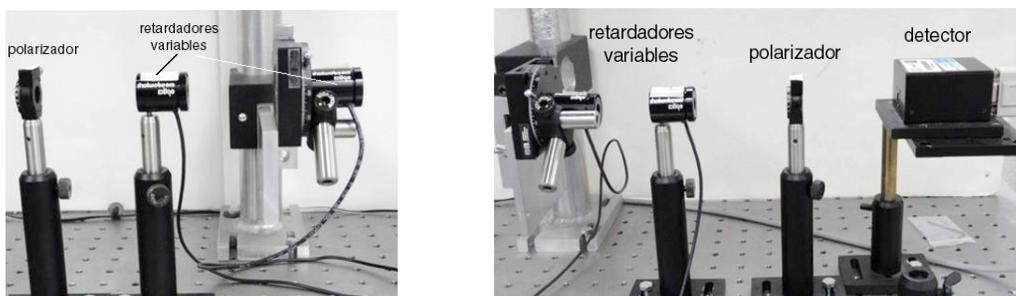


Figura 8: Nuestro arreglo experimental. A la izquierda tenemos la imagen de un polarizador lineal y dos retardadores variables de cristales líquidos para controlar la polarización de la luz que llega a la muestra. A la derecha está el sistema de dos retardadores variables, un polarizador y el detector para medir la polarización de la luz después de la muestra. Estas dos partes juntas forman el polarímetro de Mueller.

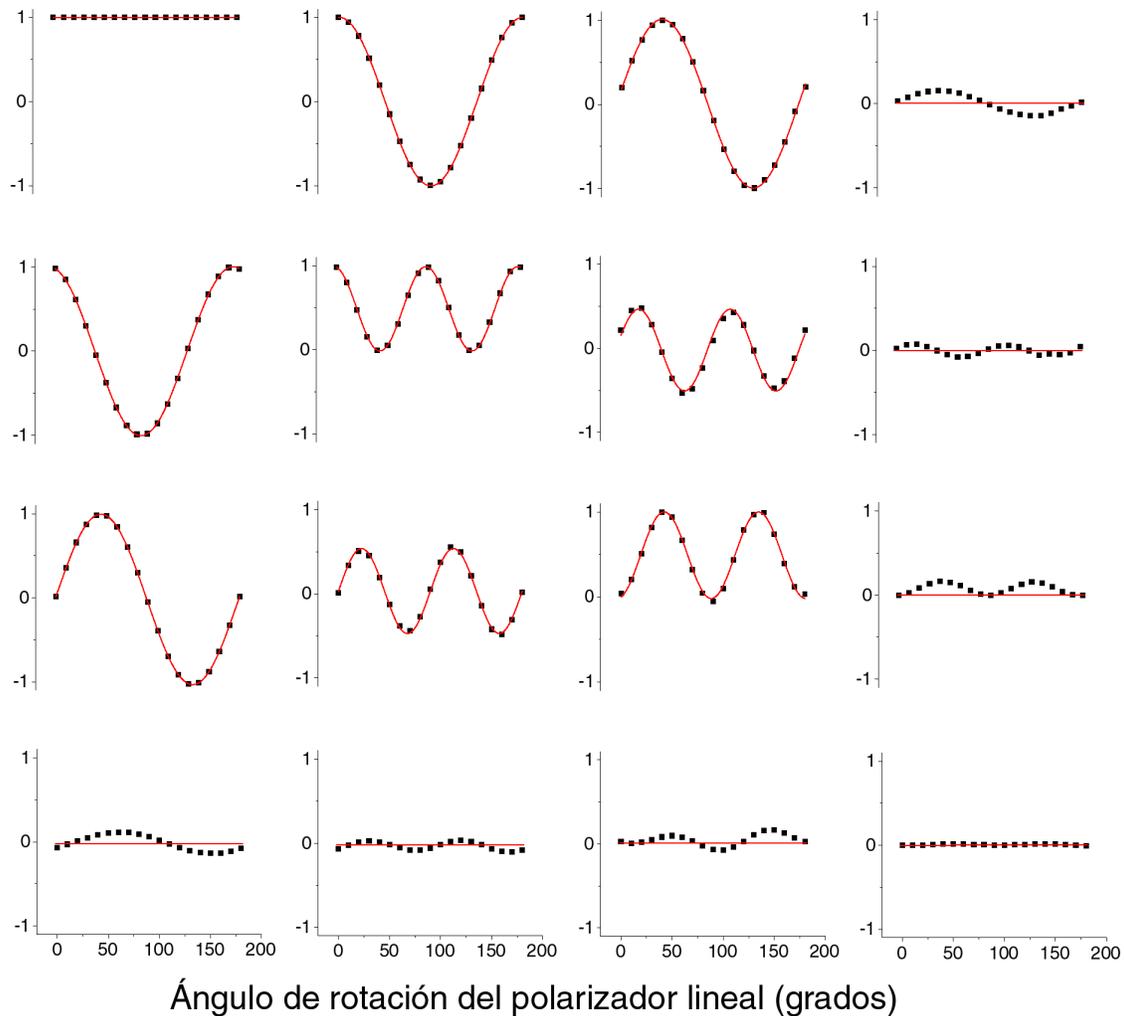


Figura 9: Resultados experimentales (puntos negros) y teóricos (líneas rojas) para la medición de los 16 parámetros de Mueller de un polarizador lineal como función del ángulo de rotación de este dispositivo.

Conclusiones

Se han descrito las técnicas que se pueden utilizar para medir la polarización de la luz, con especial énfasis en las técnicas más modernas que utilizan celdas de cristales líquidos. Estas nuevas técnicas prometen mediciones más estables y precisas que los métodos tradicionales, pero se debe encontrar técnicas para tomar en cuenta la relación no-lineal entre el voltaje aplicado a la celda y el valor

de la retardancia producida. También, se mencionó la necesidad de nuevas técnicas de análisis y calibración para corregir todos los efectos particulares de estas celdas. Además, con el aumento reciente en la utilización de celdas o arreglos de celdas de cristales líquidos, todas las técnicas mencionadas en este artículo se vuelven más importantes, cuando se requiere cada vez más precisión y estabilidad en el manejo de estos dispositivos ópticos.

Agradecimientos

Los autores agradecen a CONACyT por el apoyo del proyecto número 79814, y DGAPA, UNAM, por los proyectos PAPIIT números IN-115209 y IT-100114. J.M. López-Téllez agradece becas para estudios de doctorado de CONACyT y de CEP, UNAM.

Referencias

1. E. Hecht, *Optics Fourth Edition*, Pearson Education, Harlow, Inglaterra, Cap. 8 (2014).
2. D. Goldstein, *Polarized Light Second Edition*, CRC Press, Boca Raton, (2003).
3. R.C. Jones, *A new calculus for the treatment of optical systems, I. Description and Discussion of the Calculus*, Journal of the Optical Society of America **31**, 488–493 (1941).
4. R.C. Jones, *A new calculus for the treatment of optical systems, IV* Journal of the Optical Society of America, **32**, 486–493 (1942).
5. G.G. Stokes, *On the composition and resolution of streams of polarized light from different sources*, Trans. Camb. Phil. Soc., **9**, (1852), p. 399. Reimpreso en *Mathematical and Physical Papers Volume 3*, Cambridge University Press, London, 233 (1901).
6. J. S. Tyo, D.L. Goldstein, D.B. Chenault, y J.A. Shaw, *Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications*, Applied Optics, **45**, (22), 5453-5469 (2006).
7. C. Emde, R. Buras, B. Mayer y M. Blumthaler, *The impact of aerosols on polarized sky radiance: model development, validation, and applications*, Atmos. Chem. Phys., **10**, 383–396 (2010).

8. J.C. Stover, *Optical Scattering: Measurement and Analysis, Third Edition*, SPIE Press, Bellingham, WA, (2012).
9. W.S. Bickel y W.M. Bailey, *Stokes vectors Mueller matrices and polarized scattered light*, Am. J. Phys, **53**, 468 (1985).
10. G. Martínez-Ponce, C. Solano y C. Pérez-Barrios, *Hybrid complete Mueller polarimeter based on phase modulators*, Optics and Lasers in Engineering, **49**, 723–728 (2011).
11. J.M. López-Téllez, N.C. Bruce, J. Delgado-Aguillón, J. Garduño-Mejía y M. Avendaño-Alejo, *Experimental method to characterize the retardance function of optical variable retarders*, American Journal of Physics, **83**, 143-149 (2015).
12. J. M. López-Téllez y N. C. Bruce, *Stokes polarimetry using analysis of the nonlinear voltage-retardance relationship for liquid-crystal variable retarders*, Review of Scientific Instruments, **85**, 033104 (2014).
13. N. C. Bruce, A. Dominguez-Báez, T. Santana-Sánchez, X. Téllez-Díaz, A. Nogueira-Jiménez, and R. Nava-Sandoval, *Design of a scanning polarimetric scatterometer for rough surface scattering measurements*, J. Phys. Conf. Ser. 274, 012135 (2011).
14. J. M. López-Téllez y N. C. Bruce, *Mueller-matrix polarimeter using analysis of the nonlinear voltage-retardance relationship for liquid-crystal variable retarders*, Applied Optics, **53**, 5359-5366 (2014).