

# **Análisis de funcionamiento de controlador manual de polarización**

S.A. Cotrino, J.D. Jimenez  
Departamento de Física, Universidad de los Andes, Bogotá D.C., Colombia

## **Resumen**

En fibra óptica monomodo, el estado de polarización de la señal que se transmite puede cambiar abruptamente debido a diferentes factores (torsión de la fibra, cambio de temperatura, entre otros). Sin embargo, esta misma propiedad se puede usar para manipular la polarización presente al interior de la fibra. En el siguiente informe presentamos el funcionamiento y los efectos de un controlador manual de polarización de tres paletas (*3ppc*) observando los cambios de magnitud de la señal en los ejes principales, y demostrando que en cierta disposición, dicho controlador no realiza ningún efecto en el estado de polarización. Por otra parte, este informe también presenta una propuesta de diseño para la construcción de controladores manuales de polarización, con un diámetro de bucle de 32 mm, apto para el uso de longitudes de onda cercanas a los 810 nm, y basado en el diseño del controlador de polarización de tres paletas creado por Thorlabs, Inc. (3-paddle polarization controllers, referencia FPC 030).

## **I. INTRODUCCIÓN**

Las fibras ópticas monomodo se caracterizan por su pequeño diámetro de núcleo y apertura numérica, lo cual hace que el coeficiente de refracción del núcleo y de su material circundante sean similares y el ángulo crítico sea muy pequeño, y que que mantiene una gran cantidad de potencia al interior del núcleo [1]. Este tipo de fibra evita muchos de los problemas presentes en las fibras multimodo. Debido a que se transporta un único modo, no se presentan retrasos de diferentes modos, así como tampoco se presentan interferencias aleatorias entre los diferentes modos. Sin embargo esta fibra también se ve sujeta a los efectos de las imperfecciones en la misma, los cambios de temperatura y los esfuerzos incontrolables producto de tensiones en la fibra. Entonces, a menos de que se use una fibra que sea capaz de mantener la polarización, las magnitudes de la fase en cada eje principal pueden ser diferentes a las enviadas inicialmente, fácilmente cambiando un estado de polarización lineal a uno elíptico. Y dado que los esfuerzos internos o la temperatura pueden cambiar, el efecto sobre la polarización de la fibra se vuelve dependiente del tiempo. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que, aunque la potencia entregada en cada uno de los ejes principales varía de forma aleatoria, la potencia total se mantiene constante.

Debido a la necesidad de controlar estados de polarización en fibras monomodo, se han planteado diferentes métodos para controlar la polarización. Usando una de las variables que afectan las magnitudes de la fase en cada eje principal se podrían generar cambios controlados de la polarización. Los manipuladores manuales se presentan como una forma simple y muy útil de controlar dichos estados. Su funcionamiento consiste en la creación de birrefringencia al interior de la fibra mediante un esfuerzo inducido. Entonces, dicha birrefringencia crearía un eje rápido en el cual la señal viajaría a una mayor velocidad, y dada la diferencia de velocidades (retardancia) se podría crear un estado arbitrario de polarización.

## **II. POLARIZACIÓN DE LA LUZ**

La polarización de la luz se determina por el comportamiento de la dirección de los vectores del campo eléctrico [1]. Para luz monocromática, los tres componentes del campo eléctrico varían sinusoidalmente en el tiempo con amplitudes y fases que, generalmente, son diferentes. Entonces, en cada posición, el extremo final del vector del campo eléctrico se mueve en un plano y traza una elipse. La orientación y forma de la elipse son determinadas por el estado de polarización, mientras que su tamaño es determinado por la intensidad óptica.

Dependiendo de las amplitudes y fases de los componentes del campo eléctrico, la elipse puede degenerarse en una línea o un círculo, y es entonces cuando se dice que una onda esta lineal o circularmente polarizada, respectivamente.

### A. Magnitudes y fases en la polarización.

Una onda monocromática de frecuencia  $\nu$  viajando en la dirección  $z$  con velocidad  $c$  presenta campos eléctricos en el plano  $x - y$  descritos por la siguiente ecuación [1]

$$E(z, t) = Re \left\{ A \exp \left[ j 2 \pi \nu \left( t - \frac{z}{c} \right) \right] \right\} \quad (1)$$

El vector envolvente complejo  $A = A_x \hat{x} + A_y \hat{y}$  determina la polarización de la onda. Expresando  $A_x$  y  $A_y$  en términos de sus magnitudes y fases, se obtiene

$$A_x = a_x e^{j \varphi_x}, A_y = a_y e^{j \varphi_y}$$

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

$$E_x = a_x \cos \left[ 2 \pi \nu \left( t - \frac{z}{c} \right) + \varphi_x \right]$$

$$E_y = a_y \cos \left[ 2 \pi \nu \left( t - \frac{z}{c} \right) + \varphi_y \right]$$

Estas ecuaciones de campo eléctrico son las ecuaciones paramétricas de una elipse. Sin embargo, cuando uno de los componentes se desvanece (como  $a_x = 0$ ), o cuando la diferencia de fase  $\varphi = \varphi_y - \varphi_x$  es  $0$  o  $\pi$ , se obtiene luz linealmente polarizada. Por otra parte, si  $\varphi = \pm \pi/2$  y  $a_x = a_y = a_0$  se obtienen las ecuaciones paramétricas de un círculo.

### B. Vectores y matrices de Jones

Una onda plana monocromática viajando a lo largo de un eje se caracteriza totalmente por su envolvente complejo  $A$ . La información de dicho vector se puede presentar en un vector llamado vector de Jones.

$$J = \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \end{bmatrix} \quad (2)$$

Con dicho vector se puede determinar la intensidad total de la onda, además de la orientación y la fase de su estado de polarización.

Así como se pueden presentar las ondas a partir de vectores, los sistemas de polarización se pueden representar por matrices de transformación, llamada matrices de Jones. Entonces, los estados iniciales y finales de la onda se relacionan por dicha matriz de transformación.

$$J_2 = T J_1$$

Por otra parte, los vectores y las matrices de Jones pueden cambiar su sistema de coordenadas fácilmente usando las siguientes transformaciones

$$J' = R(\theta) J$$

$$T' = R(\theta) T R(-\theta)$$

donde

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

## III. Controlador manual de polarización de fibra de tres paletas

Para crear birrefringencia en una fibra es necesario someterla a un esfuerzo que cambie las características que determinan la transmisión de información en la misma. Además de estimular dicho fenómeno, se debe poder tener control sobre el eje de transmisión en el cual se causa el efecto (es decir, tener control sobre el eje rápido).

### A. Retardancia inducida

El controlador manual de polarización de fibra de tres paletas (three-paddle polarization controllers, *3ppc*) induce esfuerzo en la fibra torciéndola en forma de bucle sobre el plano de tres paletas que están diseñadas para admitir estos bucles con ciertos diámetros. Cada paleta también puede cambiar su ángulo de inclinación con respecto al plano horizontal, de tal forma que cambia en eje rápido de la fibra en cada segmento sujeto a su respectiva paleta.

La retardancia ( $\varphi$ ) generada en cada paleta se puede calcular usando las siguientes ecuaciones [2]:

$$\varphi(\text{radianes}) = \frac{2\pi^2 a N d^2}{\lambda D} \quad (4)$$

$$\varphi(\text{No. ondas}) = \frac{\pi a N d^2}{\lambda D} \quad (5)$$

Donde  $a$  es una constante (0.133 para fibras de silicio),  $N$  es el número de bucles en cada paleta,  $d$  es el diámetro del revestimiento del núcleo (cladding diameter),  $\lambda$  es la longitud de onda usada, y  $D$  es el diámetro del bucle.

La configuración habitual usada en un controlador de polarización de tres paletas es una serie de retardancias (en secciones de onda)  $\lambda/4$ ,  $\lambda/2$ ,  $\lambda/4$ . Dicha configuración permite completo control de los estados de polarización. También se pueden usar mecanismos con dos paletas y una serie de retardancias  $\lambda/4$ ,  $\lambda/4$ . Sin embargo, una gran ventaja que tiene el uso de un sistema ordenado con retardancias  $\lambda/4$ ,  $\lambda/2$ ,  $\lambda/4$  es que, en determinada posición de las paletas, el controlador no realiza ningún cambio en el sistema de polarización entrante.

Conociendo la fase  $\Gamma$  que se retarda el componente deseado, se puede usar una matriz de Jones que ilustre los efectos sobre un estado inicial de polarización.

$$T_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(-j\Gamma) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Esta matriz transforma la onda con componentes de campo  $(A_{1x}, A_{1y})$  en otra onda con componentes  $(A_{1x}, e^{-j\Gamma} A_{1y})$  retardando el componente  $y$  en una fase  $\Gamma$  y dejando el componente  $x$  invariable.

### B. Retardancia inducida con ángulo arbitrario

Como se desea tener control sobre el eje rápido de la fibra, la matriz que representa el sistema de un retardador de onda se hace dependiente a cierto ángulo arbitrario  $\theta$  mediante una transformación. Entonces, usando la matriz presentada en (3), se obtiene una matriz que representa la retardancia generada por una paleta a un ángulo  $\theta$ .

$$T_\theta = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta + e^{-j\Gamma} \sin^2 \theta & \sin \theta \cos \theta (1 - e^{-j\Gamma}) \\ \sin \theta \cos \theta (1 - e^{-j\Gamma}) & \sin^2 \theta + e^{-j\Gamma} \cos^2 \theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

Dado que el mecanismo completo contiene tres paletas, la matriz que representa este mecanismo es el producto de las matrices de cada paleta,

$$T_{3ppc} = T_{\theta_3} T_{\theta_2} T_{\theta_1} \quad (8)$$

Sin embargo, las torsiones y las diferentes disposiciones de los segmentos de la fibra fuera del controlador generan cambios en el estado de polarización de la onda, y también se ven representados por una matriz de transformación. Entonces la matriz de transformación total sería

$$T_T = T_{fibra} T_{3ppc} = T_{fibra} T_{\theta_3} T_{\theta_2} T_{\theta_1} \quad (9)$$

Si se lograra que la matriz de transformación del controlador de polarización fuera la matriz inversa de la matriz de Jones de la fibra, cada matriz tendría un efecto igual y contrario sobre el estado de la onda transportada y no se presentaría ningún cambio. En otras palabras, la matriz de Jones de todo el sistema sería una matriz identidad. Pero, dado que sobre las propiedades fuera del controlador no están reguladas, no se tiene pista alguna sobre la matriz de transformación de la fibra.

Sin embargo, esta falta de información no debe verse como un impedimento para el uso de fibras monomodo, pues el gran rango de ángulos y las tres paletas ofrecen un control absoluto del estado de polarización presentado.

## IV. Estudio de cambio de polarización

Para observar la incidencia del controlador manual en los estados de polarización de una señal enviada a través de una fibra, se usó el controlador de polarización de tres paletas producido por Thorlabs, Inc. (3-paddle polarization controllers, referencia FPC 030). La señal óptica usada fue generada por un láser Ne-He de 633 nm de emisión. Entonces es necesario usar una fibra con un rango de longitud de onda de operación que abarcara dicha longitud. Además de eso, había que tener en cuenta que dicho controlador está

diseñado para trabajar con fibras de diámetro máximos de  $900\ \mu\text{m}$  (unos  $0.9\ \text{mm}$ ). Las especificaciones del controlador [2] recomiendan especialmente para estas longitudes de onda fibras producidas por la misma industria con referencia 630 HP, SM600 y S630-HP. En los experimentos realizados se usó un cable conector P1-630A-FC-2 (también fabricado por Thorlabs, Inc.) con una fibra óptica SM600 que cumplía con los requerimientos de transmisión, pero dicho cable conector tenía un diámetro total de  $3\ \text{mm}$ , que excede por mucho la medida máxima requerida de  $0.9\ \text{mm}$ . Entonces, fue necesario acomodar los cables a cada paleta con ayuda de cinta pegante.

Inmediatamente frente al laser emisor, se ubicó un polarizador graduado Phywe (Ref. 08610-00) para conocer el estado de la señal al ingresar a la fibra. El ingreso de luz se permitía por una alineación simple del láser con la fibra, sujeta con un soporte de apareamiento. Al otro extremo de la fibra se usó un portador de fibra (Ref. PAF-X-11-B de Thorlabs, Inc.) para focalizar la luz en un fotodiodo provisto por el laboratorio de óptica cuántica de la universidad de los Andes. Entre el fotodiodo y el portador de fibra se ubicó otro polarizador graduado para conocer el estado de polarización de la onda al salir del sistema. Entonces, usando como variables el estado de polarización final (ángulo del polarizador en la salida), el ángulo de inclinación y el número de giros de cada paleta, se comprobó el efecto en el estado de polarización. Es necesario resaltar que los dos polarizadores graduados usados eran polarizadores lineales, y que por lo tanto no se podía rescatar información sobre la fase o la orientación del estado de polarización. La información obtenida solamente ilustra los cambios en magnitud de cada componente del campo eléctrico (intensidad de la luz en cada dirección de polarización).

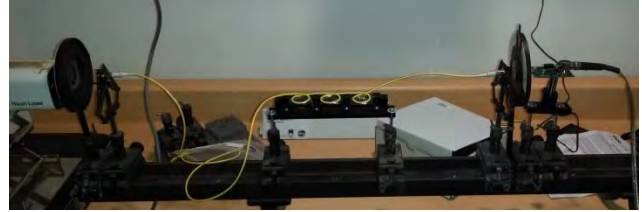


Imagen 1. Montaje usado para la toma de datos. Se observan los bucles de los cables conectores formados con cinta pegante.



Imagen 2. Vista lateral del montaje. Se observa la disposición del portador de fibra, el polarizador y el fotodiodo.

Dado que solo se podía extraer información sobre la magnitud de los campos eléctricos en cada eje, era imposible saber si se estaba manejando un estado polarizado circular o elíptico. Entonces no se justificaba observar los cambios en una gran cantidad de ángulos. Sin embargo, sí se utilizaron configuraciones que permitían conocer comportamientos básicos del sistema y que evitaban el problema creado por el desconocimiento de la matriz de transformación de la fibra  $T_{fibra}$ .

En la toma de datos se usaron dos disposiciones de retardancia:  $\lambda/8, \lambda/4, \lambda/8$  y  $\lambda/4, \lambda/2, \lambda/4$ . Usando la ecuación (7) se pueden determinar fácilmente las cantidades de bucles en cada paleta, de tal forma que se cree al retardancia deseada.

Tabla I. Retardancia producida por el número de bucles representado en el cable conector PC-630A-FC-2.

No. Bucles	1	2	3	4
Retardancia(ondas)	0,122	0,24	0,36	0,48

Para una longitud de onda de  $633\text{ nm}$  y usando un sistema de paletas con diámetro de  $27\text{ mm}$ , el error de retardancia de  $1.9\%$  en las tres paletas. Entonces, aunque el sistema de retardancias no es exactamente  $\lambda/4, \lambda/2, \lambda/4$ , el error es muy pequeño y no es tenido en cuenta.

En la toma de todos los datos se dispuso que la polarización de la luz al ingresar a la fibra horizontal, con una matriz de Jones

$$J_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Además de esto, el ángulo de inclinación de las paletas se tomó con respecto a la vertical, siendo  $0^\circ$  el ángulo en el plano vertical y aumentándose en el giro hacia afuera de la mesa.

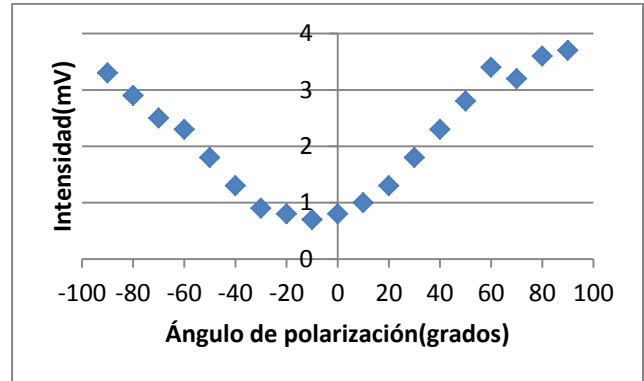
También hay que tener en cuenta que el láser usado presentaba variaciones en su intensidad emitida. Dicho cambio afectaba a las medidas de amplitud haciendo que estas oscilaran, debido a que tanto el cable conector como el controlador manual aumentan estos cambios.

Todos las medidas de ángulos de polarización tiene una incertidumbre de  $\pm 1^\circ$ , las medidas de intensidad tiene una incertidumbre de  $\pm 0.05\text{ mV}$ , y las medidas de los ángulos de inclinación de las paletas tiene una incertidumbre de  $\pm 2^\circ$ .

#### A. Sistema de retardancia $\lambda/8, \lambda/4, \lambda/8$

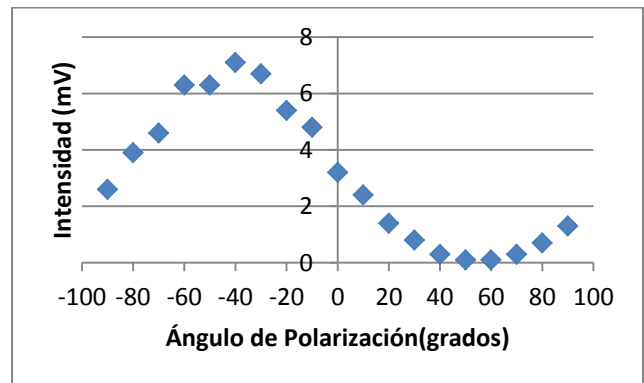
Inicialmente, se tomaron mediadas de intensidad con diferentes ángulos de inclinación entre las 3 paletas. Teniendo en cuenta el estado de ingreso de la luz, si la matriz de transformación total del sistema fuera una matriz identidad, el vector de Jones terminaría siendo el mismo y la gráfica de datos obtenida sería muy similar a una curva sinusoidal con un valle en  $0^\circ$ .

Dado que no sabemos el estado de polarización que ingresa al controlador manual, no podemos predecir cuales van a ser los resultados, ni podemos afirmar que se realiza una rotación del estado inicial de polarización. Solo podemos mostrar los cambios que se presentan, como los efectuados con una disposición de paletas a  $-45^\circ, 90^\circ$  y  $45^\circ$ .



Gráfica 1. Datos obtenidos con un sistema de retardancias  $\lambda/8, \lambda/4, \lambda/8$  y una disposición de paletas a  $-45^\circ, 90^\circ$  y  $45^\circ$ .

También podemos ver el efecto con una disposición de paletas a  $-45^\circ, 90^\circ$  y  $-90^\circ$ .

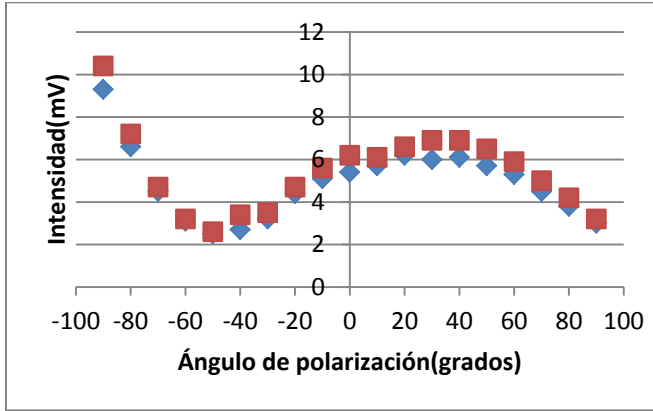


Gráfica 2. Datos obtenidos con un sistema de retardancias  $\lambda/8, \lambda/4, \lambda/8$  y una disposición de paletas a  $-45^\circ, 90^\circ$  y  $-90^\circ$ .

Al alinear las tres paletas, de tal modo que todas exhibieran el mismo ángulo de inclinación  $\theta$ , se lograba una matriz de transformación dependiente de este ángulo  $\theta$ . Para esta configuración de retardancias, la matriz de Jones del controlador manual de polarización con un ángulo  $\theta = 90^\circ$  es de

$$T_{3ppc} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

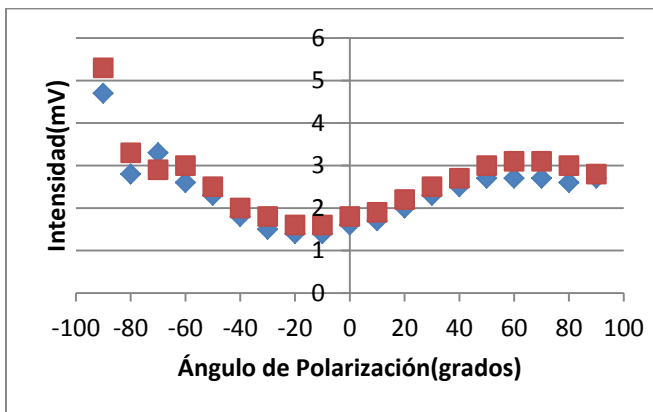
Las series de datos siguientes se presentan con dos curvas. La curva roja muestra los valores máximos de intensidad, y la gráfica azul los valores mínimos.



Gráfica 3. Datos obtenidos con un sistema de retardancias  $\lambda/8$ ,  $\lambda/4$ ,  $\lambda/8$  y las paletas alineadas a  $90^\circ$ .

Por otra parte, la matriz de transformación del sistema controlador con las paletas alineadas a un ángulo  $\theta = 45^\circ$  es de

$$T_{3ppc} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$



Gráfica 4. Datos obtenidos con un sistema de retardancias  $\lambda/8$ ,  $\lambda/4$ ,  $\lambda/8$  y las paletas alineadas a  $45^\circ$ .

En las gráficas se observa claramente la diferencia de la influencia en el estado de polarización. Dado que no se conoce que patrón de polarización exhibe la señal

antes de entrar al controlador manual de polarización, no podemos afirmar con seguridad cuales serían los efectos esperados en el sistema.

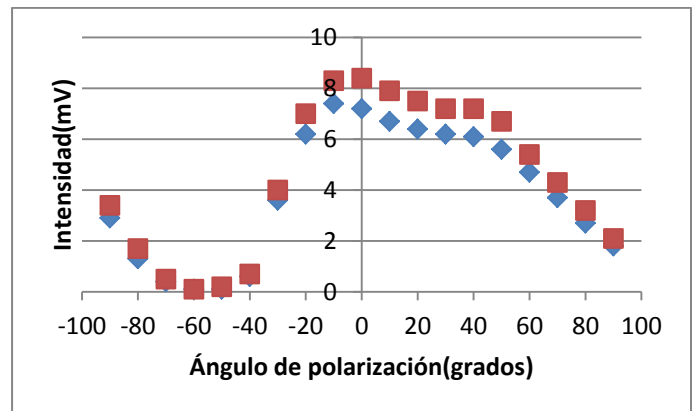
### B. Sistema de retardancia $\lambda/4$ , $\lambda/2$ , $\lambda/4$

Este sistema de retardancias es especial porque permite replicar es estado de polarización de ingreso al controlador manual. Usando la matriz 7 para cada ángulo de retardancia, y después de realizar la multiplicación de las tres matrices con el mismo ángulo de inclinación  $\theta$  es posible demostrar que la matriz de Jones para el controlador es la matriz identidad.

$$T_{3ppc} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Entonces, al obtener como matriz de transformación la matriz identidad el sistema de paletas no tendría ningún efecto sobre el estado de polarización de la onda.

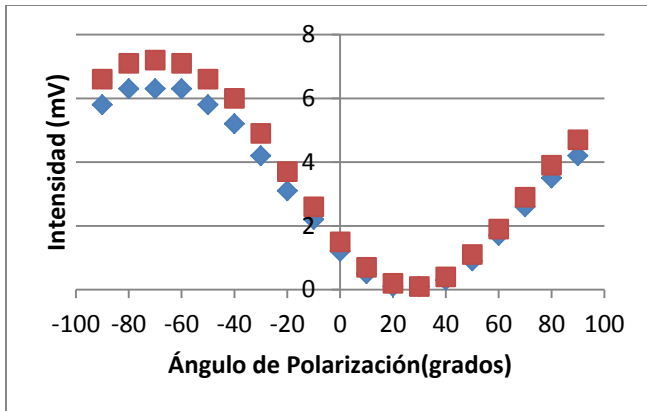
Inicialmente se tomaron datos sin el cable ubicado en el controlador manual.



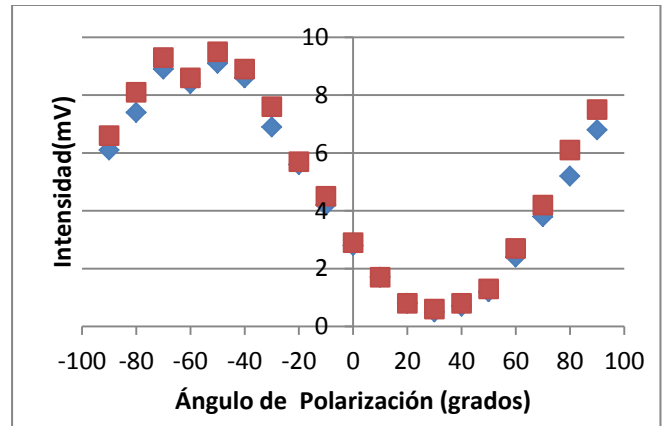
Gráfica 5. Datos obtenidos del sistema sin usar el controlador manual de polarización.

El comportamiento no presenta una curva sinusoidal clara por las torsiones presentadas en la fibra y los pequeños movimientos que esta misma torsión generaba.

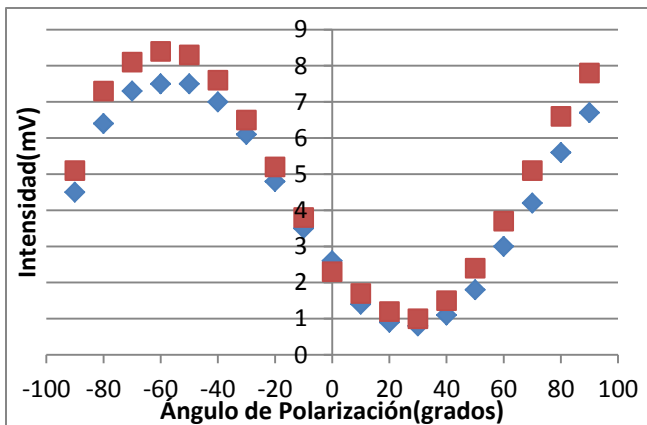
Después, al ubicar el cable conector en el polarizador manual, se puede apreciar un comportamiento sinusoidal equivalente para todas las disposiciones con las paletas al mismo ángulo  $\theta$ .



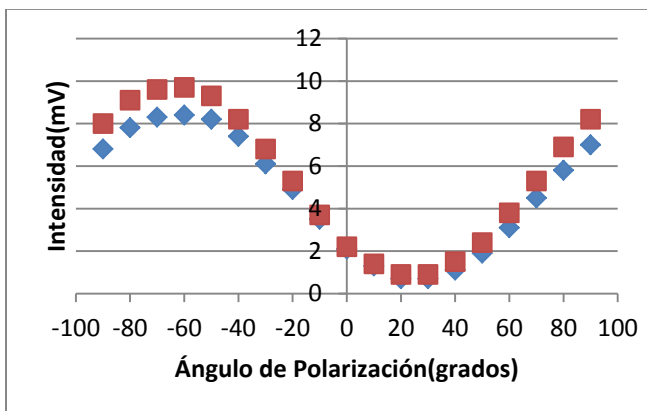
Gráfica 6. Datos obtenidos con un sistema de retardancias  $\lambda/4$ ,  $\lambda/2$ ,  $\lambda/4$  y las paletas del controlador manual de polarización alineadas a  $90^\circ$ .



Gráfica 9. Datos obtenidos con un sistema de retardancias  $\lambda/4$ ,  $\lambda/2$ ,  $\lambda/4$  y las paletas del controlador manual de polarización alineadas a  $-30^\circ$ .



Gráfica 7. Datos obtenidos con un sistema de retardancias  $\lambda/4$ ,  $\lambda/2$ ,  $\lambda/4$  y las paletas del controlador manual de polarización alineadas a  $45^\circ$ .



Gráfica 8. Datos obtenidos con un sistema de retardancias  $\lambda/4$ ,  $\lambda/2$ ,  $\lambda/4$  y las paletas del controlador manual de polarización alineadas a  $0^\circ$ .

Las gráficas anteriores son muy similares, y demuestran la invariancia del comportamiento cuando el ángulo de inclinación  $\theta$  es el mismo para las tres paletas. En este caso, el pico de intensidad se presenta a aprox.  $60^\circ$ , y el valle a  $30^\circ$ . Además de eso, las magnitudes presentadas son muy similares, lo cual permite afirmar que el estado de polarización no ha cambiado.

#### V. Diseño de controlador de polarización para $\lambda = 810 \text{ nm}$ .

Thorlabs, Inc. Ofrece diferentes diámetros para los bucles (27mm y 56 mm para sistemas de 3 paletas, y 18 mm para sistemas de dos paletas). Estos diámetros generan diferentes retardancias para diferentes longitudes de onda y diámetros aplicados. Sin embargo, lograr la retardancia exacta de  $\pi$  o  $\pi/2$  es muy difícil, y normalmente se logran buenas aproximaciones. Como se dijo anteriormente, usando una longitud de onda de 633 nm y un diámetro de bucle de 27 mm, el error de retardancias es insignificante. Para una longitud de onda de 850 nm se recomiendan 2 bucles [2] para una retardancia de  $\lambda/2$  y 6 bucles para una retardancia de  $\lambda/4$ , y el error aumenta a 13.6%. Si se usa esta misma disposición con  $\lambda = 810 \text{ nm}$ , el error sigue creciendo hasta 19.4%. Por esto se considera necesario crear un nuevo sistema controlador de polarización que permita trabajar con la longitud de onda deseada (810 nm) y presente un error despreciable. Usando las ecuaciones de retardancia (4) y (5), se observa que el diámetro de

bucle adecuado para este nuevo sistema sería 32 mm, y el error asociado a cada retardancia sería de 0.8%.

Teniendo en cuenta esto, junto con el diseño del controlador manual de 3 paletas de Thorlabs Inc. (3-paddle polarization controllers, referencia FPC 030), se propone un diseño nuevo que permita la manufactura de un nuevo controlador manual de polarización. Este diseño puede apreciarse en los anexos.

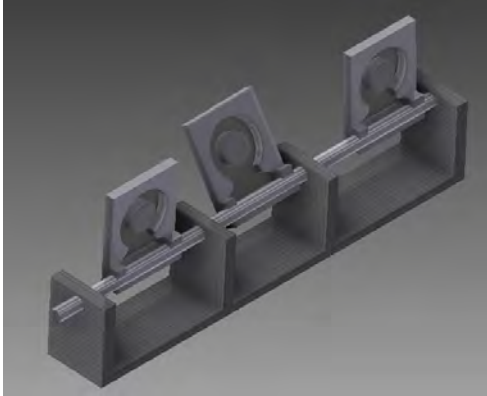


Imagen 3. Modelado del nuevo diseño del controlador manual de polarización.

## VI. Agradecimientos

Agradecemos profundamente a David Guzmán y al laboratorio de óptica cuántica por el apoyo logístico y teórico que presto a esta investigación. También agradecemos al estudiante Kristian Salavarieta por su apoyo con el diseño del controlador manual.

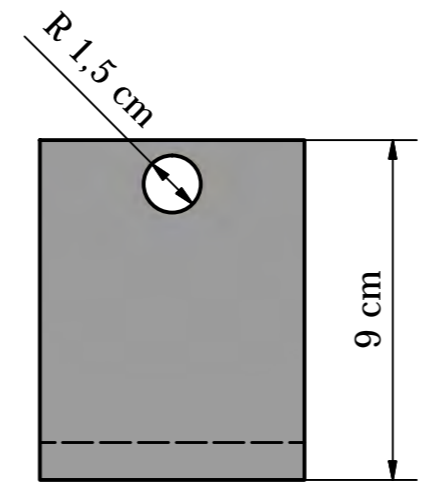
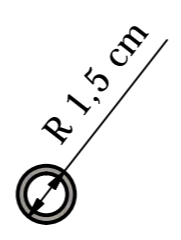
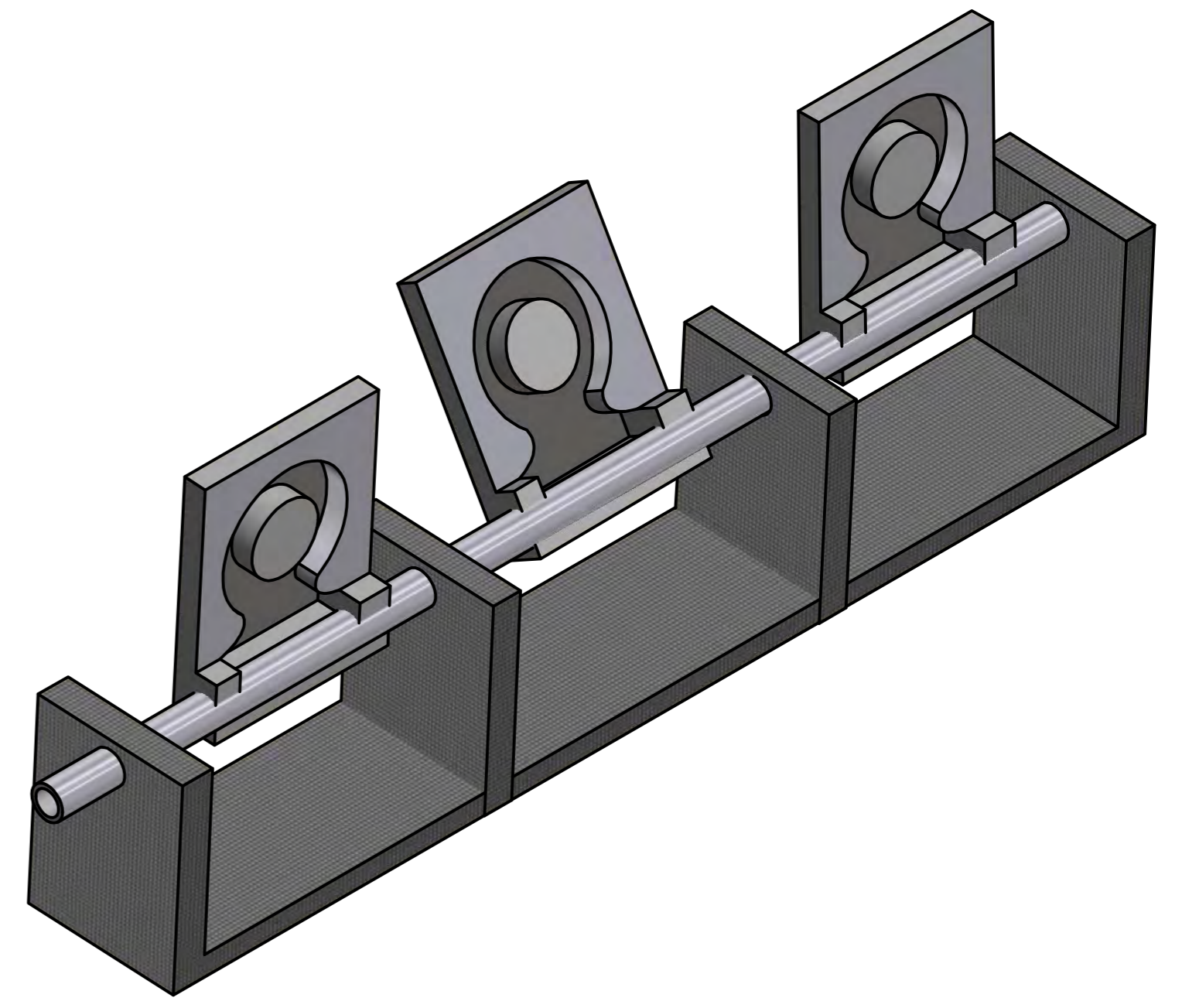
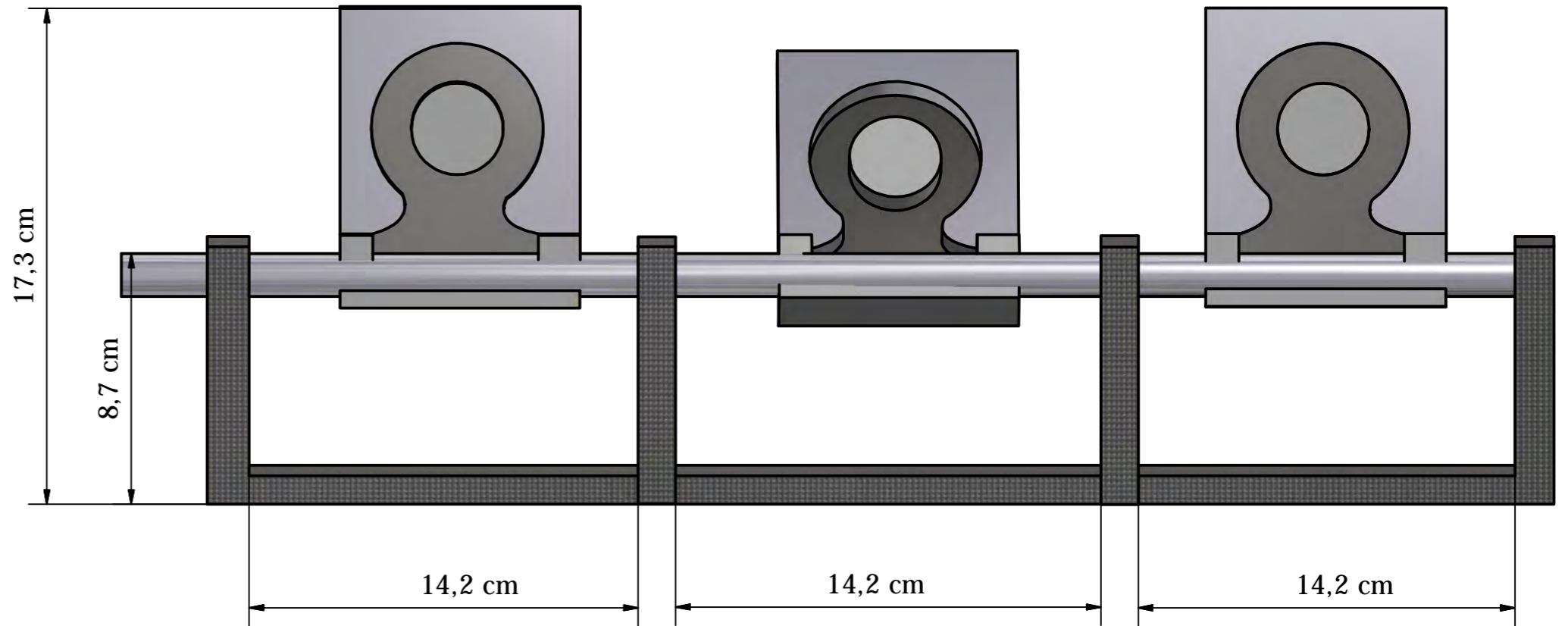
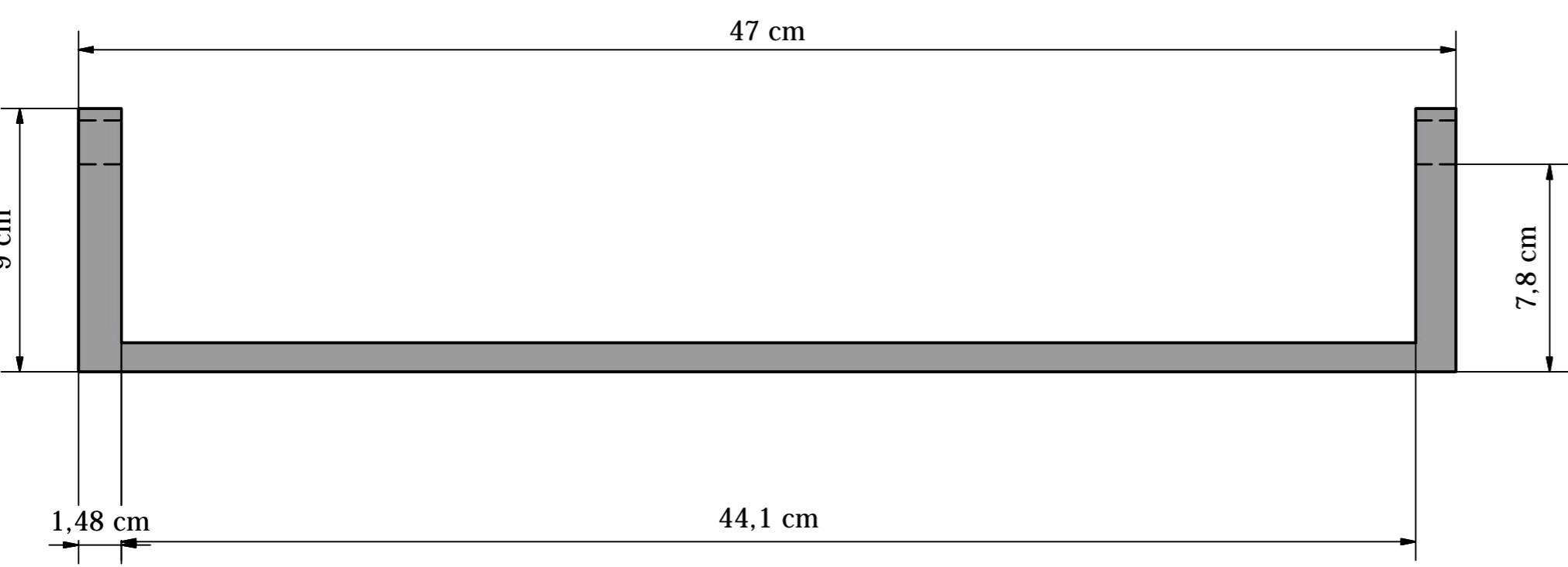
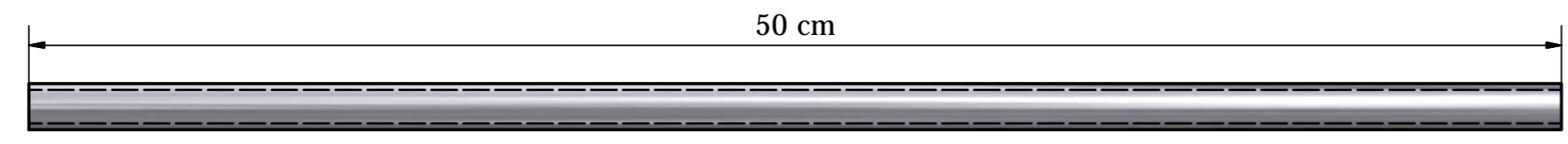
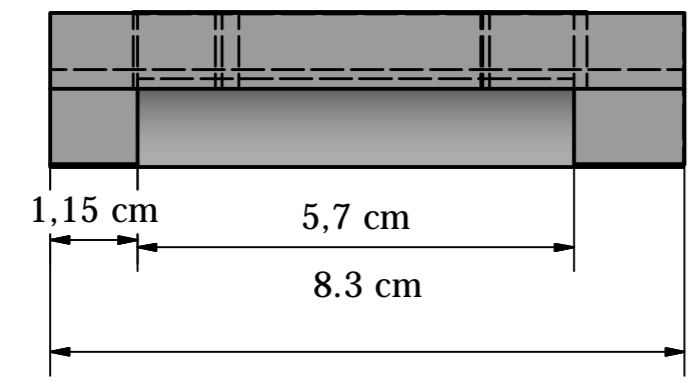
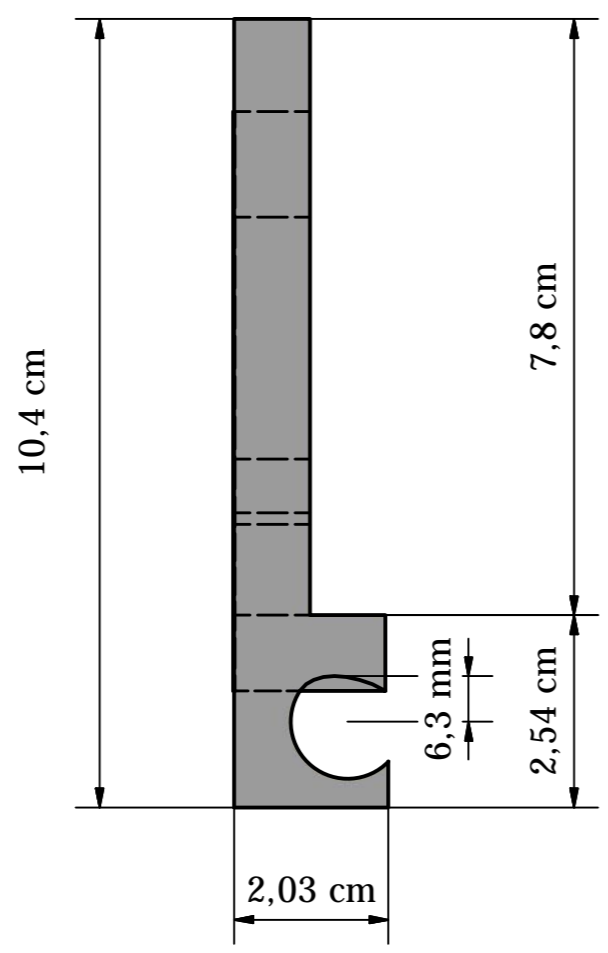
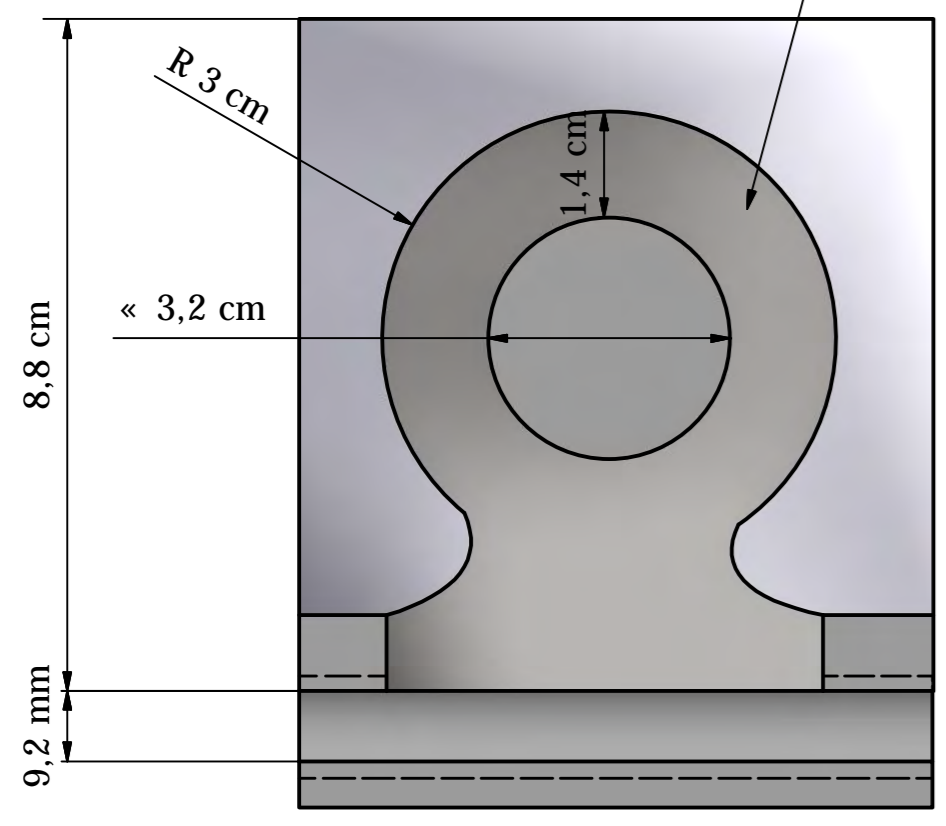
## VII. Referencias

[1] B.E.A. Saleh, M.C. Teich, *Fundamentals of Photonics* (John Wiley & Sons, Inc., New York, 1994), p. 193-203, p.287.

[2] Thorlabs Inc. *Manual Fiber Polarization Controllers, User Guide*



A Profundidad de la pieza:  
1,3 cm desde el tope, hasta  
la base del cilindro  
recortado interno.



Diseño de	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha	
				09/05/2014	
			Paletas óptica		
			Universidad de los Andes	Edici <sup>o</sup>	Hoja 1 / 1