



Low-Cost Motorized Fiber Polarization Controller for High-Precision Fiber Optic Interferometers

Matías Reyes and Jaime Carine

EasyChair preprints are intended for rapid dissemination of research results and are integrated with the rest of EasyChair.

February 1, 2024

Low-cost motorized fiber polarization controller for high-precision fiber optic interferometers.

1st Matias Reyes Figueroa

Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad Católica de la Santísima Concepción
Concepción, Chile
mreyesf@ing.ucsc.cl

2nd Jaime Cariñe

Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad Católica de la Santísima Concepción
Concepción, Chile
jcarine@ucsc.cl

Abstract—This work presents the feasibility of developing a low-cost motorized fiber optic polarization controller. To validate the operation of the design, a Mach Zehnder interferometer was built on single-mode optical fiber, whose visibility of optical interference will depend on the difference in polarization between its arms. Using this design, a visibility greater than 0.99 was obtained. These results demonstrate the proposed device’s high precision, whose construction cost is lower by an order of magnitude compared to commercial devices. The low optical losses, the flexibility of the electronic design, and the feasibility of its miniaturization suggest that the results of our system allow progress in autonomous optical systems, which can be applied to quantum communications systems.

Index Terms—Motorized Fiber Polarization Controllers, Mach Zehnder interferometer, Arduino microcontroller

I. INTRODUCCIÓN

Los interferómetros construidos sobre fibras ópticas son dispositivos que utilizan interferencias para medir y modular propiedades físicas [1]. Uno de los parámetros más importantes de los interferómetros es la visibilidad óptica, que mide la capacidad de generar interferencias máximamente constructivas y mínimamente destructivas. La visibilidad en un interferómetro construido con fibra óptica depende de las perturbaciones en sus brazos, incluidas vibraciones mecánicas y cambios de temperatura, que producen ruido de fase [2] y ruido de polarización [3]. El tiempo de fluctuación de ruidos de fase es en ms [2], mientras que la polarización puede mantenerse días sin variar, ya que esta depende de la disposición geométrica, de la fibra óptica [3]. Esto es, solo depende de factores como la aislación ante perturbaciones mecánicas, por esto, los sistemas reales buscan operar con sistemas cuánticos no dependientes de la polarización [5] y en otros casos se busca aislar los sistemas utilizando protecciones ante vibraciones tales como espumas [6]. La sensibilidad a estas variables ha permitido el uso de interferómetros de fibra óptica como sensores de vibraciones mecánicas, temperatura y presión [1]. Por otro lado, los interferómetros de fibra óptica se utilizan en sistemas cuánticos para producir y medir estados cuánticos que, codificados en polarización, tiempo o camino, pueden transmitirse a largas distancias a través de las mismas fibras ópticas [4], [5]. Sin embargo, la calidad de estos sistemas

se ve afectada por las variaciones de polarización y el ruido de fase [6]. De esta manera, midiendo la visibilidad es posible estimar la calidad de los estados a producir y/o medir [2], [7]. Aunque la variación de la polarización es lenta en comparación con el ruido de fase, debe controlarse constantemente para garantizar la máxima visibilidad, lo cual es crucial en este tipo de sistemas. La importancia de los sistemas cuánticos, radica en que son capaces de proveer aplicaciones en seguridad de las comunicaciones, un ejemplo de esto es la distribución cuántica de claves o QKD (por sus siglas en inglés) [5].

Para controlar la polarización se han propuesto dispositivos pasivos, que tienen un precio cercano a los 300USD [8]–[10]. Estos dispositivos son útiles en sistemas que permiten la alineación por parte de un usuario, generalmente en entornos de laboratorio. Sin embargo, las aplicaciones comerciales requieren sistemas de control externos y/o autoajustables. Por esta razón, se han propuesto controladores de polarización motorizados, lo que eleva naturalmente el costo de fabricación del elemento por la incorporación de motores y controlados, cuyo precio puede llegar a los USD 600 [11], y dispositivos optoelectrónicos que operan con circuitos fotonicos, cuyo precio de fabricación eleva considerablemente el costo de integrar esta tecnología en controladores de polarización. Por lo anterior, estos elementos están disponibles comercialmente con precios superiores a los USD 1000 [12], [13]. Por otro lado, algunos controladores pueden acoplar sistemas de espacio libre a fibras ópticas [14], sin embargo, este acoplamiento introduce una pérdida óptica que afecta dramáticamente a los sistemas de precisión como los sistemas de medición de estados cuánticos [4], [5].

Dado el costo de los controladores de polarización actuales, en este trabajo proponemos un sistema de control de polarización simple construido sobre electrónica y fibras ópticas de bajo costo, al cual denominaremos controlador de polarización propuesto o CPP, que permite un control de polarización de alta precisión. Las bajas pérdidas, la posibilidad de integración electrónica a sistemas más complejos y la viabilidad de su miniaturización hacen de nuestro sistema un punto de partida en la automatización del control de polarización en sistemas autónomos, que puede aplicarse a sistemas de comunicaciones cuánticas.

II. MODELADO DE LA POLARIZACIÓN EN UN INTERFERÓMETRO

Un interferómetro Mach Zehnder (MZ) de dos brazos se construye uniendo dos dispositivos de acoplamiento de fibra óptica conocidos como divisor de haz (BS), cuya matriz se muestra en la Eq. 1.

$$BS = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Los dos BSs forman el interferómetro esquematizado en la Fig. 1, aquí el primer BS dividirá la señal x_1 en dos señales ópticas (y_1 y y_2), para finalmente recombinarlos en el BS de salida, obteniendo las señales y_1'' y y_2'' . La matriz para el interior del

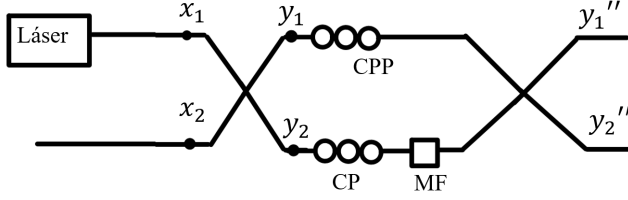


Fig. 1. Modelo del interferómetro MZ. CP: controlador de polarización manual. MF: modulador de fase. CPP: controlador de polarización propuesto.

MZ ($M_{\alpha,\theta}$) está dada por la variación de atenuación entre el brazo 1 y el brazo 2 (α) y el modulador de fase (MF), que puede generar una fase controlada electrónicamente (θ). Bajo estos parámetros tenemos:

$$M_{\alpha,\theta} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \alpha e^{j\theta} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Usando estas matrices, podemos modelar la matriz del interferómetro MZ como: $M_{MZ} = BS \cdot M_{\alpha,\theta} \cdot BS$ [6] Dado el diagrama de la Fig. 1, el vector del campo eléctrico a la salida de la MZ se describe por:

$$\begin{pmatrix} y_1'' \\ y_2'' \end{pmatrix} = BS \cdot M_{\alpha,\theta} \cdot BS \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Entonces, considerando $I_{y_1''} = (y_1'')^* \cdot y_1''$ y que el láser tiene una intensidad normalizada ($x_1 = 1$ y $x_2 = 0$), tenemos:

$$\begin{pmatrix} I_{y_1''} \\ I_{y_2''} \end{pmatrix} = \frac{(1 - \alpha^2)}{4} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} + \alpha \begin{pmatrix} \cos^2(\frac{\theta}{2}) \\ \sin^2(\frac{\theta}{2}) \end{pmatrix} \quad (4)$$

De Eq. 4, podemos ver que el parámetro α es ópticamente ajustable usando atenuadores entre los brazos del MZ. Sin embargo, cuando se aplica una variación lineal en el modulador de fase (MF), la interferencia se ve afectada por la diferencia modal en la polarización de cada brazo. Empíricamente, en el laboratorio podemos ver como al cambiar la polarización desde CPP, la parte sinusoidal se atenúa y aparece un offset. Para modelar la polarización usaremos el coeficiente β que representa la proyección modal de polarización, es decir, si $\beta = 1$ ambos brazos tienen la misma polarización. Para

el desplazamiento observado, definimos una función $f(\beta)$ dependiente del mismo factor, es decir:

$$\begin{pmatrix} I_{y_1''} \\ I_{y_2''} \end{pmatrix} = \left\{ \frac{(1 - \alpha^2)}{4} + f(\beta) \right\} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} + \alpha \cdot \beta \begin{pmatrix} \cos^2(\frac{\theta}{2}) \\ \sin^2(\frac{\theta}{2}) \end{pmatrix} \quad (5)$$

Considerando un sistema sin pérdidas, entonces las intensidades a la salida deben sumar la intensidad normalizada de la entrada (

$$I_{y_1''} + I_{y_2''} = 1$$

). Esto permite despejar la función $f(\beta)$ de la Eq. 5, obteniendo:

$$\begin{pmatrix} I_{y_1''} \\ I_{y_2''} \end{pmatrix} = \left\{ \frac{(1 - \alpha^2)}{4} + \frac{(1 - \beta)}{2} \right\} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} + \alpha \cdot \beta \begin{pmatrix} \cos^2(\frac{\theta}{2}) \\ \sin^2(\frac{\theta}{2}) \end{pmatrix} \quad (6)$$

De Eq. 6, podemos analizar la visibilidad de la interferencia óptica. La visibilidad se define como: $V = (I_{max} - I_{min}) / (I_{max} + I_{min})$. Observe cómo los valores de intensidad máxima y mínima dependen de las funciones sinusoidales moduladas electrónicamente por MF. De aquí, al igualar las intensidades ($\alpha = 1$) obtenemos que la visibilidad solo dependerá del factor de proyección en polarización $V = \beta$.

Por tanto, experimentalmente podremos evaluar la calidad de la polarización evaluando la visibilidad directamente de las señales obtenidas en el sistema.

III. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL

Los componentes principales de nuestra configuración óptica son el BS, el MF y el CPP. El BS (ver Fig. 2.a) es un dispositivo pasivo construido en fibras ópticas, mientras que el MF es un Modulador de Fase Electro-Óptico construido con un cristal de Niobato de Litio (ver Fig. 2.b) [15], ambos son elementos comerciales. Por otro lado, en la Fig. 2.c se muestra el diseño propuesto (CPP). A diferencia de los controladores de polarización manual tradicionales (CPMT) [10], nuestra propuesta es motorizada, y aunque la calidad en el control de polarización deben ser las mismas, la organización de las fibras en nuestro diseño permiten la incorporación de fibras en cadena, cuya montura puede ser controlada desde paletas conectadas con servo motores. De esta forma, la propuesta consta de tres servomotores controlados por un microcontrolador Arduino, el cual se alimenta y programa desde una computadora. Cada servomotor controla una paleta que integra una fibra óptica enrollada en N vueltas de 2.7cm de diámetro. Estos parámetros están configurados para cambios de polarización de paletas de cuarto de onda (N=2) y media onda (N=3). Los parámetros se obtienen según los ajustes de CPMT [10].

La configuración utilizada en el sistema se muestra en la Fig. 3. De esta figura, la fuente de luz proviene de un láser VIAVI (A) con una longitud de onda de 1550 nm y una potencia de 7,4 [dBm].

Este láser acoplado a fibra óptica se conecta a uno de los conectores de la BS (B). El BS divide el haz de luz acoplado los haces divididos a dos cables de fibra óptica desde ambos extremos, generando dos brazos del MZ. Uno de los brazos

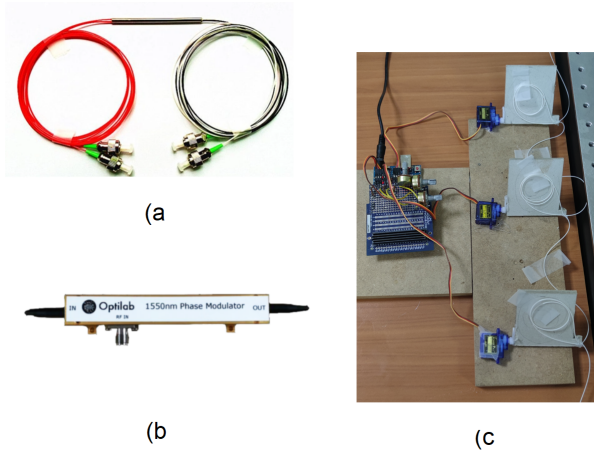


Fig. 2. Componentes principales. a) Divisor de haz. b) modulador de fase. c) controlador de polarización propuesto.

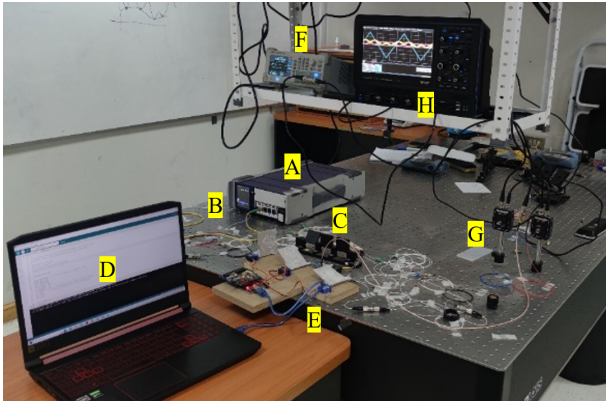


Fig. 3. Configuración experimental del sistema.

está conectado a un módulo de polarización manual (C), que, acoplado al MF, permite variar la atenuación del brazo, de tal forma que se ajusta el parámetro α , mientras que el otro brazo conecta el módulo manual de polarización motorizada experimental (E), que es alimentado y comunicado por un ordenador (D). La fase θ está controlada electrónicamente por un generador de funciones (F) que envía una señal triangular al MF, que, a su vez, genera un cambio de fase lineal que nos permite ver la interferencia sinusoidal de la Eq. 6 (ver Fig. 4). Finalmente, las salidas del MZ se conectan mediante fibras ópticas a dos fotodetectores (G), convirtiendo las señales de intensidad óptica en señales eléctricas, visualizadas en el osciloscopio (H).

IV. RESULTADOS

Para evaluar la proyección de polarización modal (β), primero se evalúa la interferencia con un controlador de polarización manual [9]. Estos resultados se muestran en la Fig. 4, donde la visibilidad obtenida alcanza $V = 0.9900 \pm 0.0002$ cuando $\alpha = 1$.

Con el sistema caracterizado se procede a instalar el CPP como se muestra en la Fig. 1. Después de ajustar la atenuación

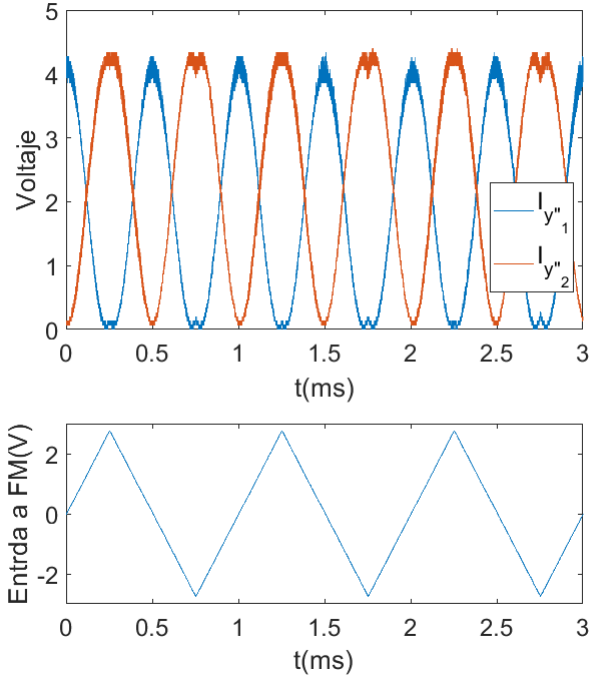


Fig. 4. Interferencia óptica desde el MZ. La imagen superior muestra como el interferómetro obtiene una visibilidad de $V = 0.9900 \pm 0.0002$ cuando se ajusta para $\alpha = 1$. El gráfico inferior muestra la excitación electrónica sobre el MF para generar una modulación de fase lineal.

entre brazos ($\alpha = 1$) se obtienen los resultados de la Fig. 5. Esta figura muestra cómo la diferencia de polarización entre caminos afecta de la misma manera a las dos intensidades de salida, tanto en offset como en amplitud, obteniendo una visibilidad de $V = 0.8666 \pm 0.0262$ ($\beta = 0.86$).

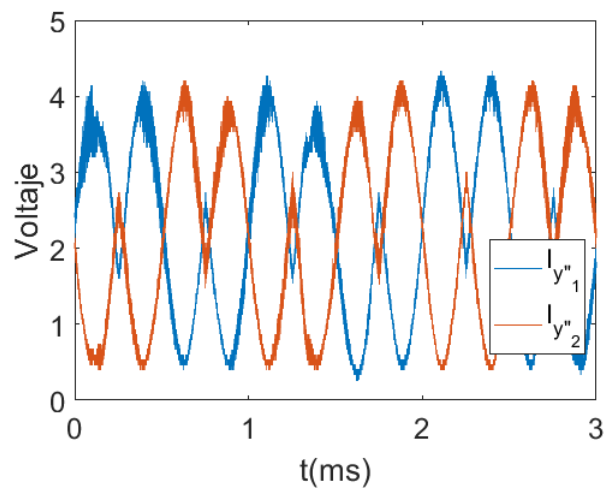


Fig. 5. Resultados de interferencia óptica al instalar el controlador propuesto.

La Fig. 6 muestra los resultados finales luego de operar nuestro sistema, desde donde se logra una visibilidad óptica

de $V = 0.9900 \pm 0.0001$, demostrando la precisión obtenida con nuestro diseño.

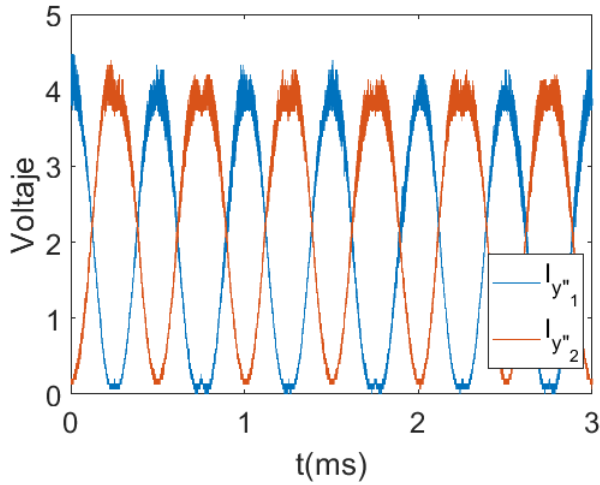


Fig. 6. Resultados de interferencia óptica alineando polarización con el sistema propuesto ($V = 0.9900 \pm 0.0001$).

Bajo la misma alineación se perturba la polarización del sistema, alcanzando una visibilidad de $V = 0.4859 \pm 0.0029$, que se corrige fácilmente con nuestro sistema, obteniendo nuevamente $V = 0.9958 \pm 0.0154$. Los resultados se muestran en la Fig. 7 y la Fig. 8 respectivamente.

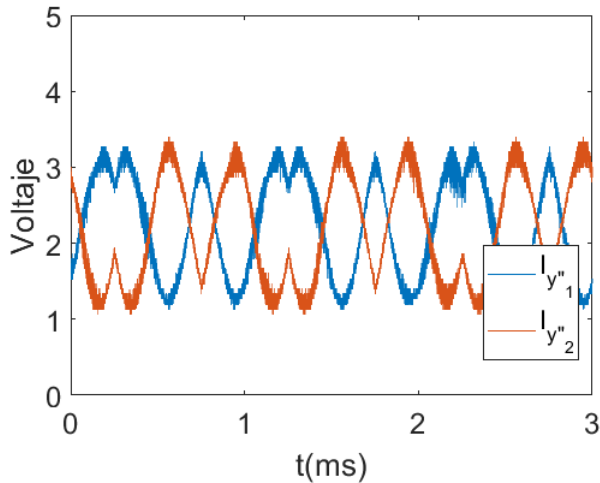


Fig. 7. Resultados de interferencia óptica desalineando la polarización arbitrariamente ($V = 0.4859 \pm 0.0029$).

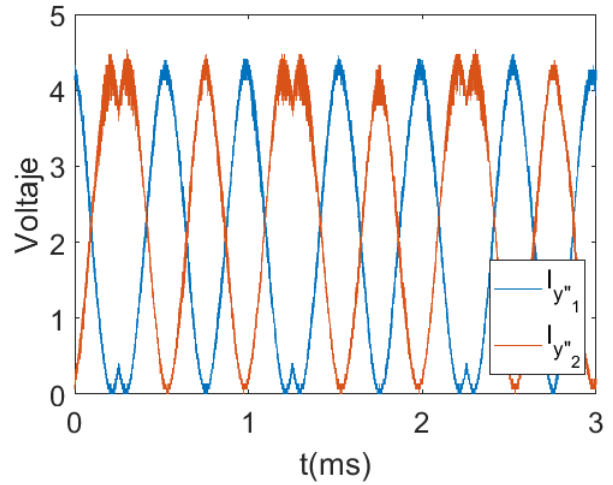


Fig. 8. Resultados de interferencia óptica utilizando el dispositivo propuesto ($V = 0.9958 \pm 0.0154$).

V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

El diseño completo contempla la compra de un microcontrolador, tres servomotores, fibra óptica de 3mts y una base inicial de cartón y madera. Todo esto implica un costo de construcción de 30USD. Sin embargo, el proyecto pretende adquirir motores más precisos, miniaturizar el elemento y construir una carcasa de plástico a partir de una impresora 3D. Con todo esto, el coste total podría llegar a los 100USD. Este precio de fabricación hace que nuestro diseño sea considerable low-cost, esto se puede revisar en la tabla I, donde se pueden observar diversos controladores de polarización de fibra óptica, los cuales pueden superar en algunos órdenes el costo del diseño propuesto.

TABLE I
COMPARACIÓN DE COSTOS POR DISPOSITIVO MOTORIZADO

Tipo Controlador	empresa	precio (USD)	ref
Motorizado	propuesto	100	
Manual	fibermart	225	[8]
Manual	Thorlabs	300	[9]
Manual	newport	680	[10]
Motorizado	Thorlabs	637	[11]
Electrónico	optosigma	1700	[13]
Electrónico	agiltron	2900	[12]
En espacio libre	Thorlabs	3200	[14]

Por otro lado, en cuanto a la precisión experimental del diseño propuesto, se puede observar cómo los módulos motorizados son una alternativa para mejorar la polarización. Aunque se obtienen resultados positivos con un gran porcentaje de mejoras, aún quedan muchos aspectos que se deben mejorar para optimizarlos. Es importante resaltar que el servomotor no es completamente estable, ya que antes de obtener un estado de polarización correcto presenta pequeñas vibraciones que pueden afectar a la hora de buscar el punto de polarización. Al tratarse de fibra óptica, estos errores pueden estar asociados no solo al rendimiento del motor, sino también

a ruidos o perturbaciones mecánicas que puedan intervenir en la señal óptica a modular. Por lo tanto, aunque utilizar el módulo presentado es posible mejorar la polarización de un sistema óptico, este debe mejorarse para evitar vibraciones del motor y desarrollar el máximo grado de rotación de los motores. Además, debido a las capacidades físicas del servomotor, el grado máximo de rotación que pueden dar es de 180° , pero por las características del sistema y la configuración de los módulos, pueden tener una capacidad de rotación de hasta 225° . A pesar de lo anterior, los resultados de visibilidad indican que el diseño propuesto tiene alta precisión para controlar la polarización de un sistema de fibras ópticas.

VI. CONCLUSIONES

En conclusión, se propone un sistema motorizado que permite eliminar o controlar la proyección de polarización modal entre dos brazos de un interferómetro MZ. Los resultados discutidos en este trabajo nos permiten afirmar que nuestro diseño es de bajo costo en comparación con los diseños comerciales actualmente y que muestra una alta presión reflejada al obtener visibilidades superiores a 0,99 con respecto a la interferencia óptica. Estos resultados podrían aplicarse en sistemas autónomos con alineación automática para aplicaciones como las comunicaciones cuánticas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento desde el Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico, con el proyecto Fondecyt 11201348 y del Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico, con el proyecto Fondef ID22I10262 y al Proyecto Ingeniería 2030 (ING222010004).

REFERENCES

- [1] Vanita Bhardwaj, Kamal Kishor, Avinash C. Sharma, Tapered optical fiber geometries and sensing applications based on Mach-Zehnder Interferometer: A review, *Optical Fiber Technology*, V 58,102302, (2020)
- [2] G. B. Xavier and J. P. V. der Weid, Stable single-photon interference in a 1 km Fiber-optic Mach Zehnder interferometer with continuous phase adjustment, *Opt. Lett.* 36, 1764,(2011).
- [3] R. Ulrich and A. Simon, Polarization optics of twisted single-mode fibers, *Appl. Opt.* 18, 2241-2251 (1979)
- [4] Diamanti, E., Lo, HK., Qi, B. et al. Practical challenges in quantum key distribution. *npj Quantum Inf* 2, 16025 (2016).
- [5] Feihu Xu, Xiongfeng Ma, Qiang Zhang, et al. Secure quantum key distribution with realistic devices. *Rev. Mod. Phys.* 92, 025002 (2020)
- [6] J. Cariñe, G. Cañas, P. Skrzypczyk, et al, Multi-core fiber integrated multi-port beam splitters for quantum information processing, *Optica* 7, 542-550 (2020)
- [7] A. Alarcón, P. González, J. Cariñe, et al. Polarization-independent single-photon switch based on a fiber-optical Sagnac interferometer for quantum communication networks, *Opt. Express* 28, 33731-33738 (2020)
- [8] fiber-mart, 3-Paddle Polarization Controller (2023, jun). [Online]. Available: <https://www.fiber-mart.com>
- [9] Thorlabs, Fiber Polarization Controller (2023, jun). [Online]. Available: [https:// www.Thorlabs.com](https://www.Thorlabs.com)
- [10] newport, Manual Polarization Controller (2023, jun). [Online]. Available: <https://www.newport.com/>
- [11] Thorlabs, Motorized Fiber Polarization Controllers (2023, jun). [Online]. Available: <https:// www.Thorlabs.com>
- [12] agiltron, High-Speed Polarization Controller (2023, jun). [Online]. Available: <https://agiltron.com/>
- [13] optosigma, Electronic Polarization Controller (2023, jun). [Online]. Available: <https://www.optosigma.com/>

- [14] Thorlabs, FiberBench Manual Polarization Controller (2023, jun). [Online]. Available: <https:// www.Thorlabs.com>
- [15] optilab, 1550 nm Phase Modulator (2023, jun). [Online]. Available: <https://www.optilab.com/>